Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет

Ч48
Н34

НАУКА ЮУрГУ

Материалы 65-й научной конференции

СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 2

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2013

ББК Ч481.46.я43 + Ч215.1.я43
Н34

Оргкомитет 65-й научной конференции:
Ваулин С.Д. (председатель), Рождественский Ю.В., Спасибожко В.В., Шабиев С.Г., Спиридонов Е.К., Карпов А.Н., Соколинский Л.Б., Шестеркина Л.П., Парфентьева Н.Д., Хомутова Т.Н., Горшенин В.П., Дрозин А.Д., Гузеев В.И., Ровный Б. И., Казаринов Л.С., Солдатова Е.Л., Тошев А.Д., Майсак В.Н., Лившиц В.А., Окольнишникова И.Ю., Кундикова Н.Д., Михайлов Г.Г., Быков Е.В., Авдин В.В., Шиндина Т.А., Баев И.А., Радионов А.А., Классен А.Н., Демин А.А., Волошина И.А., Чуманов В.И., Серко И.А., Балахонова И.М., Рогозин А.Ф., Орлова Е.Ю., Борщенюк В.Н., Чванова Е.Е., Кравцов А.И., Шкерина Г.А., Давыдова О.И., Плаксин О.А., Романов Е.В.

Ответственный за выпуск С.Д. Ваулин

Н34 **Наука ЮУрГУ**: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 2. – 440 с.

ISBN 978-5-696-04455-2 (т. 2)
ISBN 978-5-696-04453-8

Представлены материалы 65-й научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников, которая состоялась в апреле 2013 года.

Отпечатано с авторских оригиналов.

ББК Ч481.46.я43 + Ч215.1.я43

ISBN 978-5-696-04455-2 (т. 2)
ISBN 978-5-696-04453-8

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

УДК 621.771.013

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГЕОМЕТРИИ ПЕРИМЕТРА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин

Разработан вариант и предложено техническое решение по модернизации стана догибки в линии производства сварных труб для магистральных газопроводов.

Ключевые слова: прикромочная полка, калибровка, асимметрия, модель.

Из деформационных операций при формовке заготовки для труб большого диаметра догибка прикромочных полок наиболее сложная.

При анализе результатов, полученных в процессе изготовления промышленной партии труб выявлен ряд очевидных факторов, которые не связаны напрямую с геометрией калибра, но в значительной мере определяет результат этой технологической операции и их необходимо рассматривать с задачами оптимизации калибровки в комплексе.

Разработки по оптимизации профиля калибра для догибки прикромочных полок эффективны при обеспечении определенного положения заготовки относительно калибра в плоскости осей валков.

На стане догибки ОАО «Волжский трубный завод» происходит произвольное изменение положения заготовки относительно калибра, что не позволяет обеспечить качество геометрии зоны догибки.

Возможна также асимметрия заготовки после формовки (рис. 1).

Рис. 1. Асимметрия заготовки после формовки

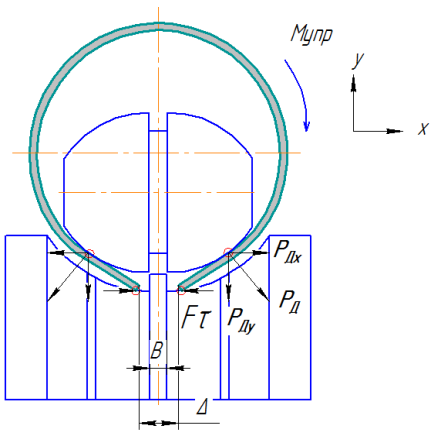


Рис. 2. Схема сил, приложенных к заготовке в плоскости осей валков (без вращения валков)

Ориентированный «на 6 часов» при задаче зазор между кромками при догибке изменяет положение за счет проворачивания вокруг продольной оси, поскольку его ширина Δ всегда на 30…50 мм больше ширины шов-направляющего кольца на нижнем валке.

При статическом нагружении, силы F_τ трения покоя (рис. 2) в сочетании с силами от упругого момента $M_{упр}$ сопротивления оболочки уравновешивают действие горизонтальных составляющих $P_{дх}$ усилий догибки, и не происходит перемещения кромок в направлении X.

При вращении валков меняется статус сил F_τ, сила трения становится активной и устремляет одну кромку к направляющему кольцу, а другую к периферии. Возникает крутящий момент сил $F_{вр}$ относительно продольной оси (рис. 3), происходит проворачивание заготовки (дрель), и существенная асимметрия как кинематическая, так и силовая. При этом на всех калибровках проявляются дефекты, в виде плоского непроформованного участка.

Природа возникновения упомянутой выше асимметрии чисто стохастическая. Это может быть и изменение позиции оси вращения валка, и асимметрия условий трения по половинкам калибра, и другие факторы.

Практика подтверждает как факт возникновения существенной разницы позиции кромок относительно вертикальной плоскости симметрии, так и различие в результатах подгибки (рис. 4) по кромкам. Величина дефекта «недоформовка» увеличивается с ростом отклонения позиции заготовки относительно вертикальной плоскости симметрии.

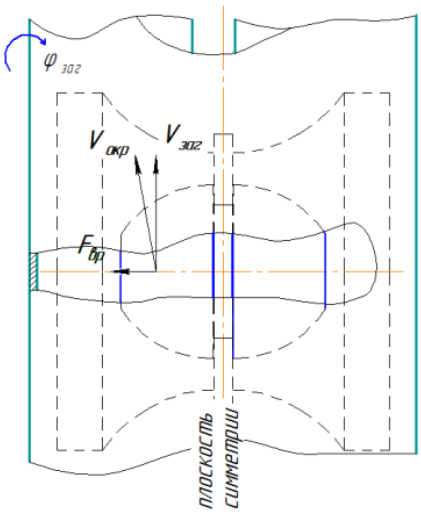


Рис. 3. К вопросу изменения угловой позиции заготовки в процессе догибки

Рис. 4. Дефект в результате асимметричного положения заготовки при догибке

Были предприняты попытки решить задачу путем многопроходной догибки с разгрузкой между проходами, однако величина упругого возврата при этом недостаточна, чтобы позиционировать заготовку в очаге по углу φ.

При изготовлении партии труб ∅711×25,4 мм, величина упругого возврата составляла не более 20…25 % от исходной величины.

Из анализа изложенных фактов можно сделать заключение о необходимости обеспечения прямолинейного движения заготовки при догибке с одновременным заполнением металлом всего калибра путем принудительного предотвращения проворачивания за счет направляющей шайбы нижнего приводного валка стана догибки.

Для этого перед станом (рис. 5) необходимо устройство в виде портала, для сведения кромок заготовки до зазора по ширине направляющей шайбы поддержание величины этого зазора в процессе догибки.

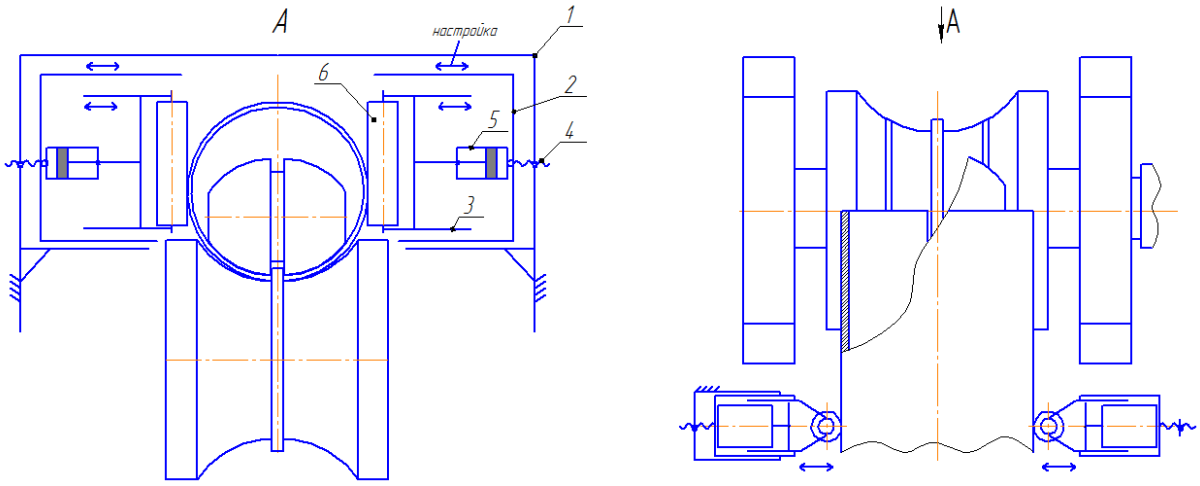


Рис. 5. Схема установки стабилизации зазора между кромками при догибке

По направляющим портала горизонтально и перпендикулярно оси заготовки перемещаются «телескопические» суппорты 2 и 3. Такое решение предлагается для того, чтобы настройку на профилеразмер трубы выполнять кинематическим установочным приводом 4, а собственно сведение кромок на каждом изделии производить короткоходовым силовым приводом 5.

Для расчета усилия, которое необходимо приложить к заготовке решена задача деформации до зазора Δ_1 упругой незамкнутой оболочки диаметром D с толщиной стенки h и зазором шириной Δ парой сил P, приложенных в непосредственной близости к одному из торцев (рис. 6).

С учетом симметрии заготовки относительно вертикальной плоскости, схематично задачу можно представить в виде задачи о перемещениях для криволинейного бруса единичной ширины, закрепленного заделкой.

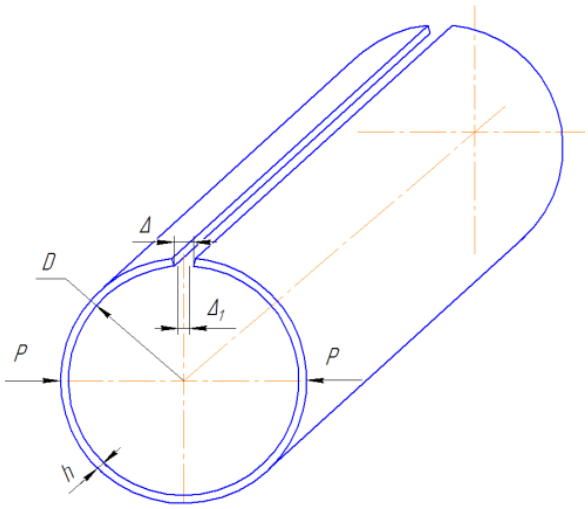


Рис. 6. Схема приложения нагрузки

$$\Delta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{M1M(p)R}{EJ} d\varphi, \qquad (1)$$

где $M1$ – момент от единичной силы; $M(p)$ – момент от приложенной нагрузки; $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ н/мм^2 – модуль упругости; J_1 – момент инерции.

Тогда изгибающие моменты составят $M(\varphi) = PR\cos\varphi$, $M1 = R\cos\varphi$, а зазор $\Delta = \frac{PR^3}{EJ}(0{,}5\varphi + 0{,}25\sin 2\varphi)$.

Из условия сплошности деформация передается по длине заготовки.

С учетом небольших деформаций, реальных для технологии, параметров R/h, аналитическое решение задачи по определению соотношения «усилие – перемещение», при сложной геометрии траектории кромки, делает его практически непригодным для инженерных расчетов.

С учетом этих обстоятельств, для нужд практики была разработана 3D компьютерная модель процесса принудительного сближения кромок внешними силами.

Из результатов цифрового моделирования, с использованием геометрических параметров реального процесса (рис. 7) следует, что для перемещения кромок трубы ∅711×25,4 мм из стали Х70 на 20 мм на сторону достаточно усилия ~ 23 т.

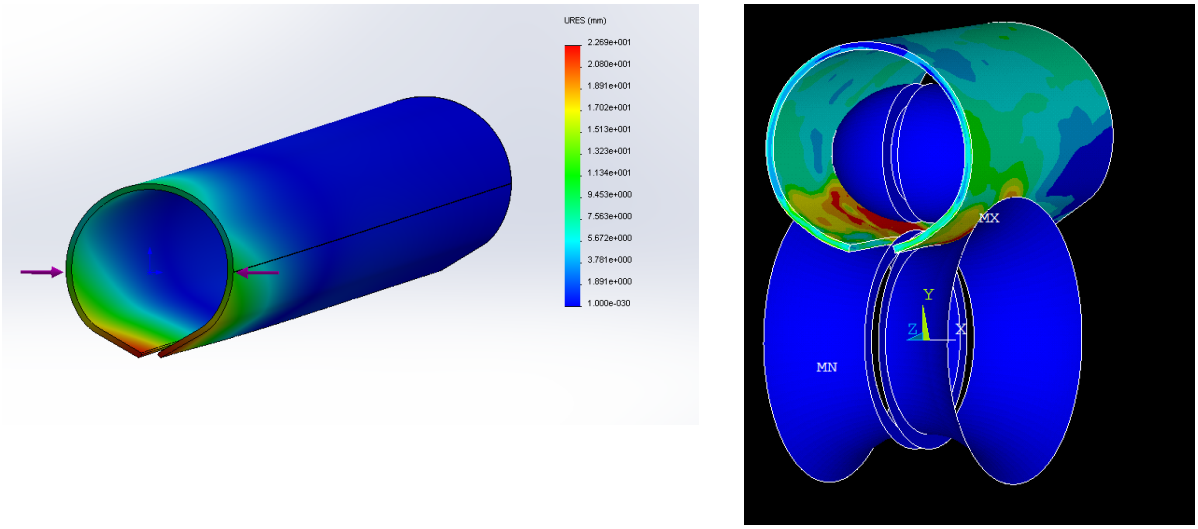


Рис. 7. Результаты моделирования системы сближения кромок и догибки в валках

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что предлагаемое решение по стабилизации зазора между кромками эффективно и позволяет стабильно обеспечить геометрию зоны догибки.

Модель является составной частью комплексной модели процесса, реализация которой позволит решать задачи выбора оптимального сочетания геометрии калибра, давления в гидросистеме, угла наклона плоскости валков, уровня установки рольгангов, в том числе и для новых маркопрофилеразмеров.

УДК 621.771.016

ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ В ПРИШОВНОЙ ЗОНЕ СВАРНЫХ ТРУБ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В.Г. Ильичев

На основании анализа кинетики распада аустенита в трубных сталях предложен путь улучшения свойств металла пришовной зоны сварных магистральных труб интенсификацией охлаждения этой зоны в линии сварки.

Ключевые слова: трубный штрипс, ударная вязкость, термоцикл, интенсивность охлаждения, градиент температур.

Современные трубопроводные транспортные систем требуют применения штрипса с сочетанием высоких прочностных и вязкостных свойств и оптимизацией технологических режимов в переделе «лист – труба» с минимальным воздействием на служебные свойства материала штрипса.

Наибольшее негативное воздействие на свойства материала оказывает термоцикл сварочных процессов. В пришовной зоне ухудшаются прочностные характеристики и снижается ударная вязкость.

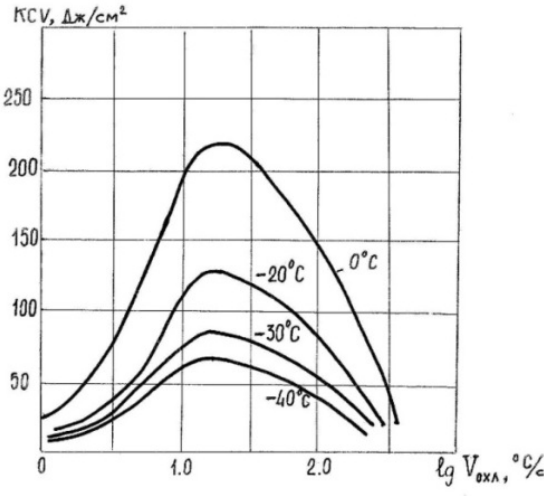


Рис. 1. Влияние скорости охлаждения металла на KCV

Известно, что в трубных сталях устойчивое образование бейнитной структуры соответствует скоростям охлаждения 10…60 °С/с (рис. 1), что обусловлено термокинетикой распада аустенита на границе основного металла, прилежащего к сварочной ванне. Изменить эту скорость можно управлением либо процессом нагрева, т. е. погонной энергией, либо процессом теплоотвода от сварочного шва. Остается путь интенсификации охлаждения зоны термического влияния сварного шва для снижения эффекта ее разупрочнения.

Тепловой баланс процесса можно записать в виде:

$$Q_{в} - Q_{шл} - Q_{ст} - Q_{охл} = \Delta Q_{ост}, \quad (1)$$

где $Q_{в}$ – теплосодержание сварочной ванны;

$Q_{шл}$ – тепло, аккумулированное шлаком за счет теплообмена;

$Q_{ст}$ – тепло, которое получил соседний прилежащий участок стенки за счет тангенциального потока;

$Q_{охл}$ – тепло, переданное конвективным потоком охладителю;

$\Delta Q_{\text{ост}}$ – остаточное тепло, аккумулированное пришовным участком стенки трубы.

Тангенциальный тепловой поток без принудительного охлаждения связан с теплопроводностью λ, толщиной стенки h и температурным напором $\operatorname{grad} T$ уравнением

$$q_{\text{ст}_1} = \lambda(T) h \cdot \operatorname{grad} T . \qquad (2)$$

Из (2) очевидно, что для увеличения скорости охлаждения нужно увеличить температурный напор в тангенциальном направлении.

Эта задача решается увеличением составляющей $Q_{\text{охл}}$ в балансе (1).

Характер распространения тепла (рис. 2) подчиняется закону тепловых волн.

$$S = 2{,}6\sqrt{at} , \qquad (3)$$

где S – глубина тепловой волны, м;

a – коэффициент температуропроводности материала, м^2/ч;

t – время после прекращения действия теплового источника, ч.

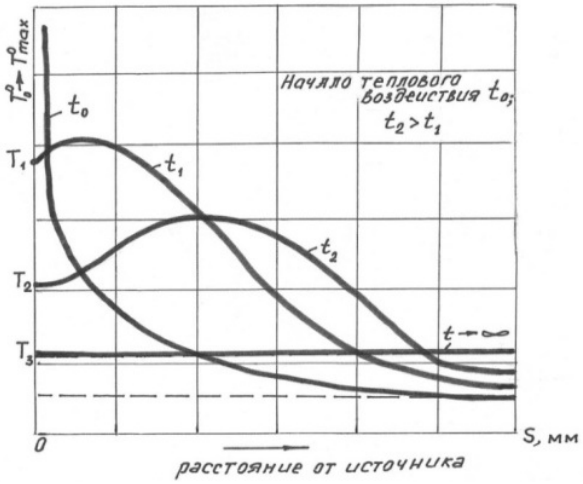


Рис. 2. Характер распространения температурной волны

Выполнены измерения температуры во времени (рис. 3, 4) при сварке трубы ∅1220×21,2 мм.

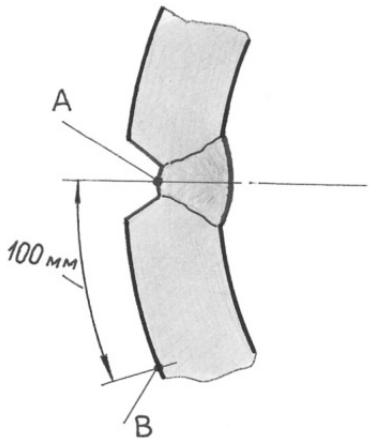


Рис. 3. Схема измерения температуры

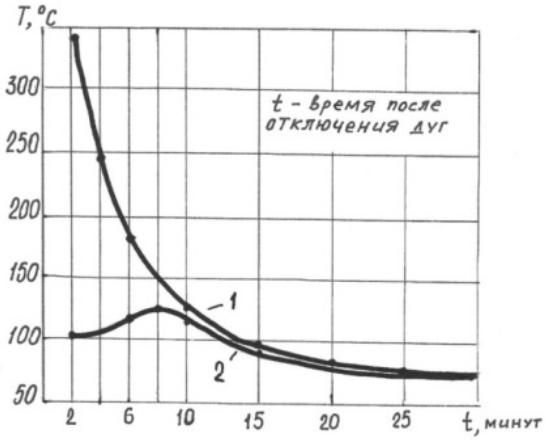


Рис. 4. Изменение во времени температуры внутреннего шва (1) и стенки (2) трубы 1220×21,6 мм (эксперимент)

Процесс теплоотвода подчиняется закону Ньютона:

$$Q = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{охл}}) F_{\text{охл}} , \qquad (4)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\dfrac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot °\text{C}}$;

$T_{пов}$ – температура охлаждаемой поверхности, °С;

$T_{охл}$ – температура охладителя, °С;

$F_{охл}$ – площадь охлаждаемой поверхности, м^2.

Из уравнения (4) очевидны пути повышения эффективности теплоотвода:

– увеличением значения коэффициента α;

– охлаждением в области максимального температурного напора, или снижением температуры охладителя;

– увеличением площади охлаждения.

Согласно теории пограничного слоя, коэффициент интенсивности конвективного теплоотвода зависит от теплопроводности пограничного слоя (свойств хладагента) и его толщины.

Из реальных, потенциальными хладагентами могут служить вода и воздух.

Вода (коэффициент теплопроводности λ_{H_2O}= 67,44 Вт/м·°С) существенно эффективнее воздуха (коэффициент теплопроводности $\lambda_{воз}$ = 0,0244 Вт/м·°С), однако применение воды в качестве охлаждающей среды ограничено целым рядом обстоятельств:

– для подачи воды необходимы средства нагнетания (насосы);

– для организации оборотного цикла нужна система канализации, очистки, охлаждения (теплообменники); это самостоятельный сложный комплекс, не предусмотренный в структуре действующей технологии;

– при водяном охлаждении, в определенных условиях, возможны чрезмерно высокие скорости охлаждения с образованием мартенситных компонентов структуры, а значит – снижение вязкостных свойств;

– обильное парообразование при пузырьковом кипении потребует специальной системы вентиляции, не предусмотренной в структуре действующего оборудования.

Воздух не обеспечивает эффективного теплоотвода при его низкой теплопроводности.

В условиях естественной конвекции, значениям α = 20…25 Вт/м^2·°С, и очевидна неэффективность такого теплоотвода.

Опыт применения свободной конвекции для охлаждения «буферных» партий труб между линиями внутренней и наружной сварки свидетельствуют о том, что:

– наличие «буферной» партии нарушает естественный ритм технологической линии и требует дополнительных площадей;

– теплоотвод в основном происходит не от зоны шва, а за счет вовлечения в тепловой баланс большей поверхности металла путем теплопроводности по периметру трубы;

– малый градиент температур границы стенка – воздух приводит к снижению скорости охлаждения и ухудшению качества пришовной зоны.

С учетом того, что коэффициент α является функцией критерия Нуссельта (Nu):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell}, \qquad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности хладагента; ℓ – характерный размер, а критерий Nu зависит от критерия Рейнольдса $Re = \omega\ell/\upsilon$, где ω – скорость потока охладителя, то очевидным средством интенсификации теплообмена является увеличение скорости потока хладоагента относительно поверхности.

Таким образом, нужно обеспечить эффективный уровень скорости потока и его локализацию в область наибольших поверхностных температур.

Охлаждения «вентиляторным» потоком воздуха со скоростью 8 м/с обеспечивает коэфициент α = 28,8 Вт/м^2·°С. Попытка увеличить температурный напор за счет водяного радиатора приводит к необходимости его мощности 25 кВт для воздушного потока 7500 м^3/ч, что свидетельствуют о низкой эффективности при достаточно высокой затратности варианта.

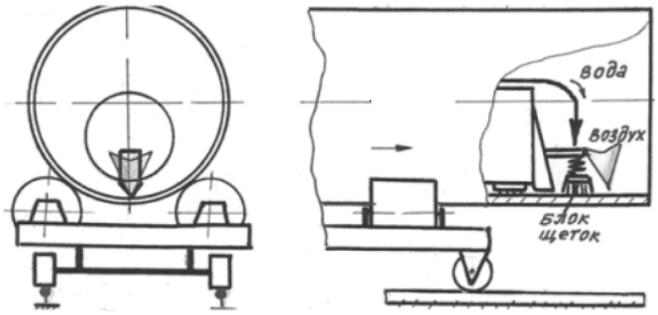


Рис. 5. Вариант принудительного охлаждения пришовной зоны

Задача обеспечения эффективного воздушного охлаждения может быть решена путем организации высокоскоростного потока хладоагента с локализацией зоны его взаимодействия с охлаждаемой поверхностью в области максимальных градиентов температур (рис. 5).

Решение не исключает возможность подачи в зону охлаждения воды при условии ее полного испарения при капиллярной подаче.

Если учесть отношение $k_э$ =5,67 энтропий пара и воды, то за счет пленочного кипения теплоотвод итенсифицируется.

Расчеты геометрии сопла подачи воздуха, с учетом данных [1, 2], свидетельствуют о возможности получения высокоскоростного потока с питанием от цеховой воздушной магистрали с давлением 0,5…0,6 Па.

В условиях адиабатического процесса при показателе адиабаты К = 1,405 можно достигнуть эффекта снижения температуры воздуха на срезе сопла в 1,2 раза по отношению к его исходной температуре.

Библиографический список

1. Back, L.H. Flow coefficient for supersonic nozzles with comparatively small radius of curvature throat / L.H. Back, P.F. Cuffel // J. of Spacecraftin Rocketes. – 1971. – Vol. 8, no. 2. – P. 196–198.

2. Опыт расчета плоских и осесимметричных сверхзвуковых течений газа методом характеристик / О.Н. Каукова и др. – М.: ВЦАНСССР, 1961.

УДК 621.731

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЕРЦИОННОЙ ВЫПРЕССОВКИ ПРЕСС-ОСТАТКА

Я.И. Космацкий

В статье обоснована задача совершенствования процесса инерционной выпрессовки пресс-остатка. Разработано устройство, обеспечивающее полное удаление пресс-остатка с использованием действий сил инерции. Показаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: пресс-остаток, прессование полых профилей, инерционное прессование.

При производстве бесшовных труб из специальных высоколегированных марок стали и сплавов достаточно широко применяется процесс прессования. Поэтому задача снижения величины пресс-остатка является одной из наиболее важных в плане повышения экономической эффективности процесса прессования. Один из путей снижения расхода металла предложен в новом техническом решении [1].

При производстве на Волжском трубном заводе прессованием некоторого сортамента труб на прессовой линии усилием 55 МН наблюдается эффект полного или частичного освобождения контейнера пресса от прессуемого металла заготовки. Возможная причина возникновения данного явления – это действие инерционных сил, возникающих в процессе прессования. В результате чего пресс-остаток протягивается через калибрующее отверстие матрицы за счёт кинетической энергии готовой части трубы.

Однако для этого должно выполняться некоторое условие, при котором кинетическая энергия части трубы готового размера, должна превышать кинетическую энергию пресс-остатка. Условие осуществления данного процесса, в обобщённом виде, записывается следующим образом:

$$\frac{m_{\text{тр}}\nu^2}{2} \geq t\left(N_{\text{ф}} + N_{\Delta} + N_{\tau}\right), \qquad (1)$$

где $m_{\text{тр}}$ – масса двигающейся готовой трубы;

ν – начальная скорость трубы;

t – время, необходимое для вытягивания пресс-остатка;

$N_{\text{ф}}$ – мощность формоизменения;

N_{Δ} – мощность, развиваемая максимальными касательными напряжениями на всех поверхностях разрывов скоростей $S\Delta$ в заготовке;

N_{τ} – мощность сил контактного трения τ_x.

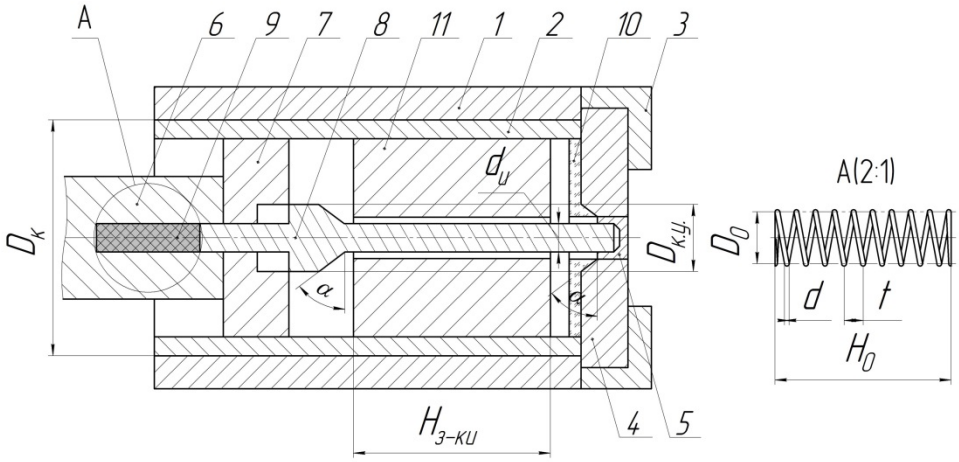
Использование математической модели условия осуществления процесса кинематического удаления пресс-остатка в первом приближении, представленной в работе [1], позволило определить граничные условия возникновения данного явления для некоторого сортамента труб.

Так установлено, что при реализации процесса прессования труб диаметром 245 мм с толщиной стенки 13 мм, при скорости перемещения пуансона ~ 300 мм/с, процесс кинематического удаления пресс-остатка становится возможным. Однако, при этом длина заготовки, позволяющая осуществить процесс кинематического удаления пресс-остатка составляет 2600 мм. Реализация указанного маршрута прессования требует не только реконструкции существующего оборудования, но и реализации изотермических условий распрессовки заготовки в контейнере.

В свою очередь, численное исследование условий осуществления кинематического удаления пресс-остатка, при изменении скоростных параметров, показало, что при увеличении скорости заготовки прямо пропорционально возрастают энергозатраты на пластическую деформацию, и процесс до конца не проходит.

Таким образом, выполненное в работе [1] теоретическое исследование граничных условий возникновения данного явления, позволило разработать рекомендации по совершенствованию способа инерционной выпрессовки пресс-остатка и устройства, обеспечивающих полное устранение указанной величины. В частности, установлено, что для гарантированного устранения пресс-остатка, требуется приложение дополнительных усилий, компенсирующих в случае их недостатка со стороны инерционного воздействия готовой части трубы.

Так, для реализации предложенного технического решения требуется проектирование соответствующего устройства, изображённого на рисунке.



Устройство в стадии центрирования пресс-иглы:
1 – контейнер; 2 – втулка контейнера; 3 – матрице-держатель; 4 – коническая матрица; 5 – центрирующий стакан; 6 – пуансон; 7 – пресс-шайба; 8 – пресс-игла; 9 – амортизирующее устройство; 10 – смазочная шайба; 11 – заготовка

Основная конструкционная особенность предложенного устройства заключается в размещении внутри пуансона аккумулирующего устройства, которое может быть выполнено, например, в виде амортизирующего элемента – пружины сжатия.

Устройство работает следующим образом. Пуансон передаёт давление пресса на пресс-шайбу и заготовку, заставляя металл вытекать в отверстие матрицы. При этом, от давления металла на конический участок пресс-иглы, который повторяет конический участок матрицы, пружина сжатия высотой H_0 сжимается до H_1, что позволяет пресс-игле переместиться в отверстие пресс-шайбы. В момент образования предполагаемого пресс-остатка прекращают движение пуансона, в результате чего труба за счет действия сил инерции протягивает пресс-остаток в отверстие матрицы.

Вместе с этим, при уменьшении объема металла в контейнере и сил действующих на конический участок пресс-иглы со стороны заготовки, пружина сжатия разжимается, и пресс-остаток продавливается коническим участком пресс-иглы в калибрующий участок матрицы. В результате чего получают готовый полый профиль.

Для выполнения заявляемого способа необходимо выполнение следующего условия:

$$W_{\text{к}}^{\text{пр.ост}} < W_{\text{к}}^{\text{пруж}} \le W_{\text{к}}^{\text{заг}}, \qquad (2)$$

где $W_{\text{к}}^{\text{пр.ост}}$ – кинетическая энергия пресс-остатка;

$W_{\text{к}}^{\text{пруж}}$ – кинетическая энергия пружины сжатия;

$W_{\text{к}}^{\text{заг}}$ – кинетическая энергия заготовки.

Максимальное усилие P, необходимое для выпрессовки металла заготовки из контейнера, с применением пресс-иглы с коническим участком, согласно устройству, можно определить по зависимости, представленной в работе [2]:

$$P = \frac{N_{\text{ф}}}{\nu_{\text{п}}} + \frac{\pi}{\sqrt{3}}\sigma_S\left(\frac{1}{4}C + \mu B\right), \qquad (3)$$

где $N_{\text{ф}}$ – мощность формоизменения;

$\nu_{\text{п}}$ – скорость прессования;

σ_S – сопротивление металла заготовки пластической деформации;

μ – коэффициент трения скольжения;

B и C – переменные параметры соответствующих зависимостей для определения мощности сил контактного трения и мощности, развиваемой максимальными касательными напряжениями на поверхностях разрывов скоростей S_Δ в заготовке, которые определяются согласно зависимостям, представленным в работе [3].

Для определения геометрических параметров пружины, по ранее определенному значению максимального усилия, необходимого для выпрессовки металла *P* и, соответственно, усилию, которое должна обеспечивать сжатая пружина при расжатии, определяется значение индекса пружины *c*, по справочным таблицам работы [4].

Применение технологии кинематического удаления пресс-остатка, с использованием предложенного устройства, позволит производить горячепрессованные трубы с экономией металла до 10 % от массы заготовки, снижая при этом усилие прессования на этапе выпрессовки материала полого профиля.

Дальнейшая разработка технологии кинематического удаления пресс-остатка при производстве горячепрессованных труб предполагает следующие этапы развития.

Во-первых, проведение экспериментального исследование процесса позволит идентифицировать потребное усилие выпрессовки пресс-остатка и выполнить соответствующий расчет аккумулирующего устройства.

Во-вторых, усовершенствование математической модели процесса инерционной выпрессовки пресс-остатка с использованием предложенного устройства и проведение компьютерного моделирования в программном комплексе «Ansys», позволит определить оптимальные скоростные режимы прессования.

В-третьих, использование полученных теоретических результатов для управления эффектом инерционной выпрессовки пресс-остатка в процессе реализации опытно-промышленного опробования покажет технологическую возможность совершенствования существующей технологии горячего прессования труб.

Библиографический список

1. Космацкий, Я.И. Совершенствование технологии изготовления горячепрессованных труб на основе новых технических решений: дис. … канд. техн. наук / Я.И. Космацкий. – Челябинск, 2012. – 213 с.

2. Выдрин, А.В. Математическое моделирование процесса прессования труб переменного сечения / А.В. Выдрин, Я.И. Космацкий, Б.В. Баричко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15 (274). – С. 72–79.

3. Выдрин, А.В. Математическое моделирование процесса прессования труб переменного сечения / А.В. Выдрин, И.Ю. Пышминцев, Я.И. Космацкий // Сталь. Производство труб. – 2013. – Вып. 2. – С. 39–41.

4. Расчет на прочность деталей машин: справ. / И.А. Биргер и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 370 с.

УДК 621.774.3.014

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ОПРАВОЧНЫХ СТАНОВ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Д.О. Струин, И.Н. Черных

Показано, что прокатка труб в непрерывных оправочных станах с использованием овальной калибровки валков с радиусными выпусками в черновых клетях способствует возникновению дефектов и образованию разнотолщинности на трубах. Разработана новая калибровка валков, способствующая уменьшению неравномерности деформаций при прокатке в калибрах непрерывного оправочного стана.

Ключевые слова: непрерывный оправочный стан; дефекты; система калибров; равномерность деформации.

В настоящее время при производстве горячекатаных бесшовных труб широкое распространение получили ТПА, в составе которых имеются двухвалковые непрерывные станы с плавающей и удерживаемой оправкой и трёхвалковые непрерывные станы с удерживаемой оправкой. Система калибров таких станов обусловлена наличием группы черновых и чистовых клетей. Количество черновых и чистовых клетей определено технологическими характеристиками оборудования.

В группе черновых клетей обычно используют следующие виды калибров: с круглой или овальной центральной зоной и выпусками по прямой; с круглой или овальной центральной зоной и выпусками по радиусу.

Многочисленными экспериментальными исследованиями [1–4], установлено, что при прокатке на автоматических и непрерывных станах имеет место неравномерность обжатия по диаметру и стенке трубы по периметру калибра, что приводит к неравномерной деформации и возникновению напряжений различных знаков в вершинах (напряжения сжатия) и выпусках калибра (растяжение). Растяжения будут тем больше, чем больше неравномерность деформации по периметру калибра.

На рис. 1 представлены исследования Я.Л. Ваткина и А.А. Шевченко по изучению трансформации дефектов круглой формы на поверхности раската после прокатки: по вершине

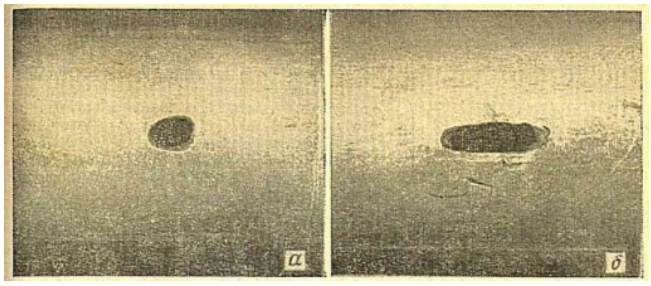


Рис. 1. Трансформация дефектов круглой формы на поверхности раската после прокатки: по вершине калибра (а) и в выпуске (б)

калибра (а) и в выпуске (б). Прокатка велась в двухвалковых калибрах на плавающей оправке.

На рис. 2 приведены исследования компании «Bao Steel» (Китай) [5] по изучению зарождения дефектов на внутренней поверхности раската в зоне выпусков двухвалкового калибра вследствие его переполнения.

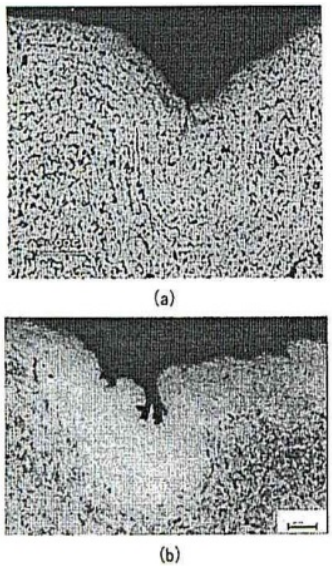


Рис. 2. Зарождение дефектов на внутренней поверхности раската в зоне выпусков двухвалкового калибра вследствие его переполнения: а – изгиб волокна в зоне выпуска калибра; б – зарождение дефекта на внутренней поверхности раската в зоне выпуска калибра

Результаты многочисленных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при прокатке труб в круглом и овальном калибрах с радиусными и прямыми выпусками толщина стенки раската в выпуске утоняется. Утонение стенки в выпуске калибра увеличивается с ростом обжатия толщины стенки раската по вершине калибра. При прокатке тонкостенного сортамента неравномерность деформаций увеличивается.

При проектировании новых систем калибров, способствующих уменьшению неравномерности деформаций и образованию дефектов различного типа, необходимо учитывать следующие основные факторы:

– геометрию калибра;

– заполнение калибра металлом;

– равномерность распределения значений толщины стенки раската по периметру поперечного сечения очага деформации;

– обеспечение вытяжной способности калибра;

– получение трубы заданных размеров.

На универсальной установке для исследования процессов продольной прокатки труб ОАО «РосНИТИ» проведено экспериментальное исследование формоизменения свинцовых патрубков диаметром 37 мм с толщиной стенки 4 мм при прокатке в различных системах калибров:

1) использование овальных калибров с радиусными выпусками при прокатке в первых двух черновых проходах;

2) использование новых калибров при прокатке в первых двух черновых проходах.

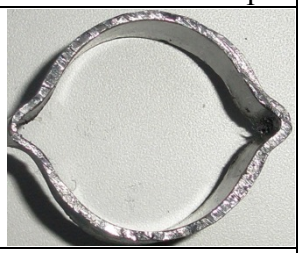
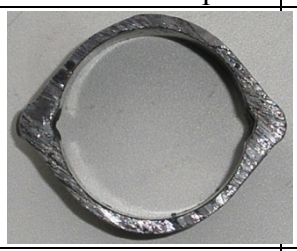
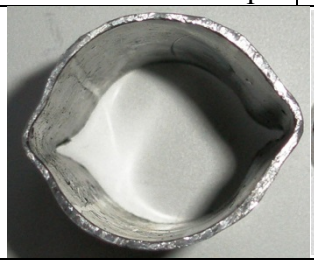
В чистовых проходах (№ 3–4) использовались одинаковые для обоих вариантов овальные калибры с радиусными выпусками.

Основное отличие нового калибра от овального с радиусными выпусками заключается в том, что зоны наибольшего обжатия толщины стенки раската располагаются симметрично относительно вертикальной и горизонтальной осей калибра, а по вершинам калибра абсолютные обжатия толщины стенки имеют меньшие значения. То есть у нового калибра имеются четыре зоны интенсивного обжатия толщины стенки раската, в отличие от овального калибра с радиусными выпусками (две зоны).

При разработке новых калибров использовали схему построения поперечного сечения очага деформации при прокатке в *i*-м калибре и математическое описание геометрии калибра, приведенные в работах [6, 7], с изменением пределов интегрирования с целью описания очага деформации двухвалкового калибра.

В таблице представлено формоизменение раската при прокатке в различных системах калибров.

Формоизменение раската при прокатке в различных системах калибров

ОВАЛЬНАЯ СИСТЕМА КАЛИБРОВ		**НОВАЯ СИСТЕМА КАЛИБРОВ**	
Первый проход в овальном калибре	Второй проход в овальном калибре	Первый проход в новом калибре	Второй проход в новом калибре
			
Третий проход в овальном калибре	Четвёртый проход в овальном калибре	Третий проход в овальном калибре	Четвёртый проход в овальном калибре
			

Применение новых калибров в черновых клетях позволило:

1. Получить более точные размеры раската по толщине стенки (в 1,8 раз);

2. Уменьшить неравномерность деформации по периметру калибров (снизить вероятность дефектообразования);

3. Уменьшить переполнение калибров.

Уменьшение неравномерности деформаций при прокатке в новом калибре (рис. 3) также объясняется более равномерным истечением металла в продольном направлении.

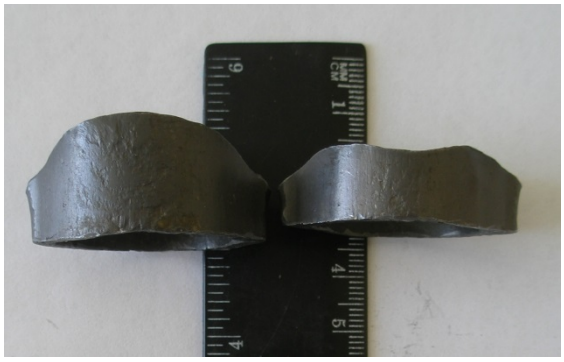


Рис. 3. Характер истечения металла в обжимной зоне калибра в продольном направлении после первого прохода (передний конец, вид сверху): 1 – в овальном калибре с радиусным выпуском; 2 – в новом калибре

Библиографический список

1. Чекмарев, А.П. Основы прокатки труб в круглых калибрах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин. – М.: Металлургиздат, 1962. – 222 с.

2. Обработка металлов давлением. Научные труды. Сборник № LIII. – М.: Металлургия, 1967. – 256 с.

3. Швейкин, В.В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке / В.В. Швейкин // Сталь. – 1949. – № 3.

4. Анализ калибровки калибра 265 мм и скоростных режимов стана PQF / А.В. Выдрин, А.В. Шеркунов, А.В. Никитюк и др. // ТРУБЫ-2011: сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск, 2011. – Ч. 2. – С. 300–306.

5. Mechanism of internal crack formation of seamless modified 9Cr-1 Mo steel tube rolled by mandrel mill and its application / Li sheng-zhi, Xu Jie, Yin Yuan, Xue Jian-guo, Feng Yuan // Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, 2007.

6. Струин, Д.О. К вопросу определения геометрических параметров при прокатке труб в трёхвалковых калибрах / Д.О. Струин // Материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 72–81.

7. Методика расчёта площади поперечного сечения очага деформации раската при прокатке труб в трёхвалковых калибрах / Д.О. Струин, В.Г. Шеркунов, А.В. Выдрин и др. // Сталь. – 2012. – № 12. – С. 41–44.

УДК 621.771.01

СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОКАТКИ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА БАЗЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Ф.С. Дубинский, П.А. Мальцев

В работе предложен подход к проектированию процессов прокатки, который базируется на совместном применении классических инженерных методик, метода конечных элементов и нейронных сетей. На базе данного подхода приводится описание его реализация в виде программного продукта для случаев прокатки сортовых профилей.

Ключевые слова: проектирование процессов прокатки, программный комплекс, метод конечных элементов, нейронные сети.

Развитие рыночной экономики обуславливает необходимость проведения мероприятий по повышению эффективности технологических процессов прокатки, расширения размерного и марочного сортамента, модернизации оборудования, что, в конечном итоге, должно обеспечивать снижение себестоимости и повышение качества продукции.

При решении такой комплексной задачи целесообразно использовать современные информационные технологии, которые позволят максимально автоматизировать выполнение расчетных и проектно-конструкторских работ.

Процесс проектирования технологий прокатки в настоящее время представляется в виде многостадийного процесса, который схематично представлен на рис. 1. При имеющихся исходных данных и цели решаемой задачи всегда целесообразно произвести оценку реализуемости последней, используя простейшие средства (калькулятор, электронные таблицы), либо основываясь на опыте и знаниях. Если задача принципиально выполнима, то производятся вычисления с помощью специальных средств. Привлечение метода конечных элементов не всегда оправдано из-за высоких трудозатрат, поэтому данная стадия часто является необязательной. Однако, при необходимости решения таких задач, как анализ напряженно-деформированного состояния или разработка режимов деформации при прокатке фасонных профилей данный этап не стоит упускать.

Дальнейшая реализация разработанной технологии требует подготовки соответствующей документации, как правило, включающей схему прокатки профилей, таблицы калибровки, монтажные схемы валков, шаблоны и контршаблоны калибров и др. Для этого используются системы компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD).

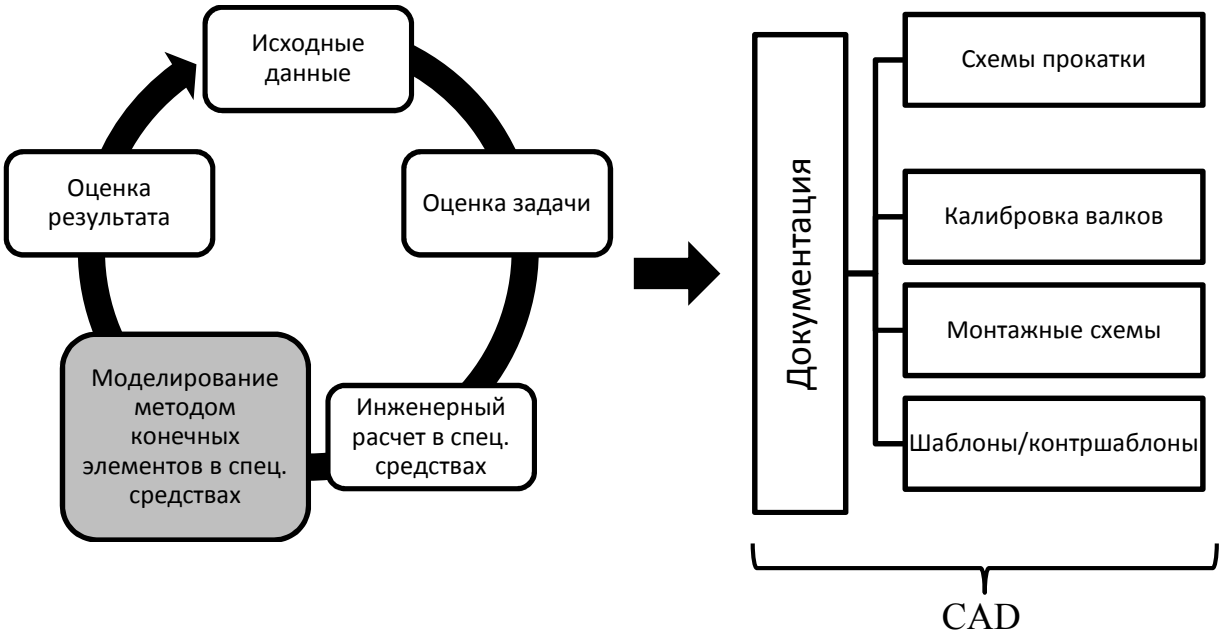


Рис. 1. Схематичное представление процесса проектирования технологий прокатки

Авторами работы разработана методика, и, на ее базе – программный комплекс для проектирования и анализа процессов прокатки. Методика предполагает совместное использование инженерных расчетов, метода конечных элементов и нейронных сетей.

Объединение расчетных методик различных «классов» позволяет решать широкий комплекс задач при наименьших трудозатратах и высокой точности расчетов.

По предложенной методике инженерными методами определяются показатели формоизменения металла, энергосиловые параметры, температурные и скоростные параметров прокатки. На основе результатов расчета либо корректируются входные данные (форма и размеры калибров, частота вращения валков и т. д.), либо дальнейшие расчеты выполняются с использованием метода конечных элементов на базе основных уравнений теории пластичности для класса трехмерных задач.

В совокупности с расчетными данными часть параметров может быть получена на основе аппроксимации экспериментальных данных в нейронной сети на третьем уровне. Параметры, которые здесь определяются зависят от данных, заложенных в нейронную сеть. Как правило, это энергосиловые параметры исследуемого процесса.

Авторами разработана система автоматизированного проектирования технологий прокатки сортовых профилей «Калибр» (САПР «Калибр»).

САПР «Калибр» разработан как независимый пакет подпрограмм, который позволяет решать следующие задачи:

– проектировать схемы прокатки и определять показатели формоизменения, режимы деформации и энергосиловые параметры для каждого прохода;

– определять производительность технологического процесса с построением графиков прокатки;

– проводить графический, текстовый и табличный анализ технологических параметров;

– формировать выходную документацию для изготовления валков и настройки оборудования;

– создавать электронный архив калибровок валков стана и др.

Гибкость работы программного комплекса достигается наличием двух режимов – графического и табличного.

В графическом режиме можно анализировать и проводить расчеты как наблюдая всю схему прокатки, так и элементы схемы из четырех смежных калибров.

При проектировании технологических процессов прокатки в условиях действующего объекта необходимо оценивать их реализуемость на конкретном оборудовании. В системе реализована возможность ввода, выбора или определения допустимых значений моментов, усилий на валки, токов и мощности электродвигателя.

Для сопоставления допустимых параметров с их расчетными значениями разработан дополнительный блок в модуле графического представления, в котором, в виде диаграмм, отображается распределение расчетных и допустимых значений выбранного параметра по проходам. В качестве примера, на рис. 2 представлена диаграмма распределения расчетных и допустимых значений усилия прокатки по клетям непрерывного стана.

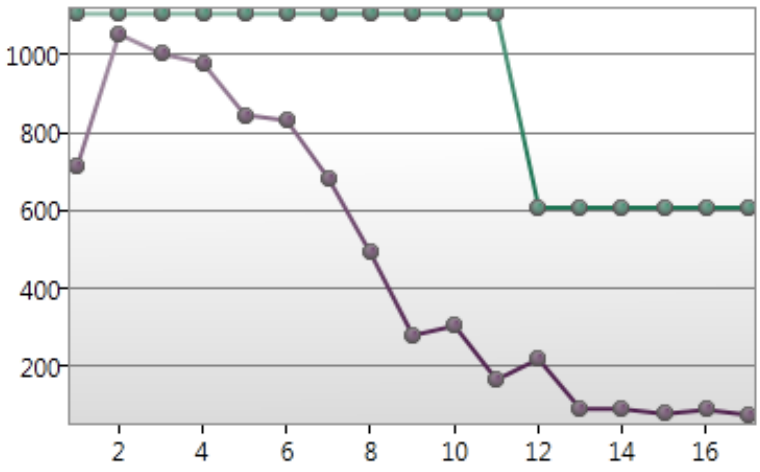


Рис. 2. Диаграмма распределения усилия прокатки по проходам:
– расчетные значения; – допустимые значения

Как показал опыт при сотрудничестве с металлургическими предприятиями, разработанная система позволяет успешно проводить моделирование, анализ и разработку технологий прокатки сортовых профилей как из рядовых, так и специальных сталей и сплавов.

Приведем примеры совместной работы с предприятиями черной и цветной металлургии по внедрению САПР «Калибр».

1. При внедрении программного комплекса в сортопрокатном производстве ОАО «Корпорация «ВСМПО-Ависма», первоначально были поставлены задачи, которые предполагалось решать с его помощью. С учетом специфики предприятия в базу данных были занесены термомеханические коэффициенты для большого ряда титановых сплавов. Кроме того, для учета возможного расширения марочного сортамента, добавлена возможность пополнения базы данных новыми марками. Изучены особенности и разработаны модели учета влияния скорости прокатки и температуры металла на коэффициент трения при прокатке титановых сплавов, что также послужило основой для уточнения методического обеспечения программного комплекса. При внедрении программного комплекса были разработаны новые технологии получения круглых профилей диаметрами от 18 до 81 мм.

2. При модернизации и внедрении системы в сортопрокатном производстве ОАО «МЗ «Камасталь» проводились работы по доукомплектованию программного комплекса. В частности, база данных была дополнена новыми марками сталей, увеличен перечень форм калибров, расширены возможности графического анализа проектируемых технологических процессов.

Помимо промышленных предприятий система используется и в учебном процессе кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением» Южно-Уральского государственного университета при проведении практических занятий по технологическим дисциплинам направления 150400.68 «Металлургия», выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Использование данного программного продукта позволяет существенно снизить трудоемкость ручного труда, повысить качество получаемых решений и, в конечном счете, готовой прокатной продукции, рассматривать различные варианты реализации технологии прокатки в короткие сроки, анализировать взаимное влияние технологических параметров, формировать в конечном виде соответствующие фрагменты необходимой документации.

УДК 621.762.3

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ПРЕССУЕМЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ ВСТАВОК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

В.А. Иванов, Б.А. Яров

Описаны основные подходы к определению теоретической плотности порошковых композиций на основе графита. При анализе результатов экспериментов по высокоскоростному прессованию порошковых композиций на основе графита, с добавками меди и фенолформальдегидной смолы выявлены аномальные значения плотности прессовок.

Ключевые слова: контактные вставки; порошковые композиции; графит; относительная плотность; теоретическая плотность.

Ведение

По сравнению с щётками электрических машин [1, 2] контактная вставка токосъемников электрического транспорта, работает в худших условиях: наличие влаги и пыли, на порядок большие переменные контактные нажатия (100–300 Н), большая плотность тока (150–3000 А/мм^2), высокие температуры нагрева (до 2000 °С), ударные нагрузки при прохождении специальных частей контактной сети. Изнашивания в паре «контактный провод (КП) – контактная вставка (КВ)» – сложный электрохимикомеханический процесс [1, 3].

Основной задачей, которая решается, при проектировании токосъемных устройств электротранспорта является минимизация износа КП при обеспечении высокой надёжности токосъёма и долговечности КВ. Основными путями решения задачи об уменьшении износа в контактной паре «КП – КВ» являются:

1) уменьшение массы контактной вставки [4];
2) уменьшение удельного электрического сопротивления (УЭС) КВ [1, 2];
3) уменьшение плотности тока [1];
4) увеличение площади поверхности контакта КВ и КП [2].

УЭС, плотность тока, площадь контактной поверхности, масса контактной вставки напрямую связаны с плотностью материала, из которого изготовлена КВ.

В настоящее время КВ изготавливаются двух типов металлокерамические и графитовые [2]. Производство как металлокерамических, так и графитовых КВ осуществляется методами порошковой металлургии. После прессования исходной порошковой композиции, изделия сохраняют некоторую остаточную пористость, а их, относительная плотность определяется соотношением

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_к}{\rho_т}, \quad (1)$$

где $\rho_к$ – кажущаяся плотность изделия из порошковой композиции;

$\rho_т$ – теоретическая плотность порошковой композиции.

Обычно относительная плотность принимает значения 60–90 % от теоретической плотности порошковой композиции.

Кажущаяся плотность изделия обычно определяется, как масса изделия, отнесенная к объёму, занимаемому скелетом. Объем занимаемый скелетом – это геометрический объем изделия без учёта объема открытых пор. На практике, часто требуется быстрая оценка кажущейся плотности изделия, поэтому её геометрический объем определяют на основании действительных размеров спрессованного изделия, без определения пористости.

Важным, с точки зрения оценки относительной плотности является, вопрос об определении теоретической плотности, под которой понимают предельную плотность порошковой композиции в отсутствии остаточной пористости.

Способы определения теоретической плотности исходной порошковой композиции

Существует несколько подходов к определению теоретической плотности смесей. Например, Л.И. Седов [5] предлагает определять теоретическую плотность смеси, как простую сумму плотностей входящих в состав смеси компонентов. При этом полагается, что компоненты занимают один и тот же объем пространства, что не всегда выполнимо.

Отдельные частицы порошков, как правило, имеют размеры много большие размеров отдельных атомов и параметров кристаллической решётки. Взаимопроникновение отдельных порошинок друг в друга затруднено. В этом случае используют другой подход, основанный на учёте объемных долей компонентов входящих в состав порошковой композиции, теоретическая плотность смеси при этом определяется уравнением

$$\rho_т = \sum_{i=1}^{n} \vartheta_i \rho_i, \quad (2)$$

где ϑ_i – объемная доля компонента в композиции;

ρ_i – теоретическая плотность компонента, кг/м^3.

Объемная доля компонента в композиции определяется по формуле

$$\vartheta_i = \frac{m_i}{\rho_i \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{m_j}{\rho_j}}, \quad (3)$$

где m_i – масса компонента в композиции, кг;

Сравнительный анализ двух рассмотренных выше подходов позволяет сделать вывод о том, что подход, предлагаемый Л.И. Седовым, дает верхнюю оценку теоретической плотности, а подход, основанный на расчёте по формулам (2) и (3), дает нижнюю оценку теоретической плотности.

Рассмотрим, случай, когда композиция составлена из двух компонентов графита и фенол-формальдегидной смолы (ФФС). Пусть масса композиции

100 г. Массовая доля графита плотностью 2060 кг/м^3 – 86 %. Массовая доля ФФС, плотностью 1200 кг/м^3 – 14 %. Нижняя оценка теоретической плотности смеси по формулам (2) и (3) равна 1872 кг/м^3, и практически совпадает с пикнометрической плотностью смеси графита и ФФС – 1850 кг/м^3, расхождение 1,1 %. Для графита плотностью 2260 кг/м^3, при тех же прочих условиях, нижняя оценка теоретической плотности – 2011 кг/м^3, расхождение с пикнометрической плотностью – 8 %. Верхняя оценка теоретической плотности смеси составляет 3260 кг/м^3, расхождение с пикнометрической плотностью – 76,2 %.

В [6] приведены данные по холодному высокоскоростному прессованию порошковых композиций на основе графита с добавлением порошков меди 10 % мас. и фенолформальдегидной смолы 14 % мас. Масса приготовленной смеси составляла 600 г. Взвешивание компонентов при подготовке смеси проводилось с точностью 0,01 г. Нижняя оценка теоретической плотности такой смеси, вычисленная по формуле (2), составляет 2154 кг/м^3 (теоретическая плотность графита принята 2260 кг/м^3). Кажущаяся плотность прессовок, полученных в результате высокоскоростного прессования со скоростями 2,88–3,58 м/с и удельными энергиями 35,2–54,6 Дж/г, составила 2620–2650 кг/м^3. Измерение массы производилось на лабораторных весах с точностью 0,01 г, линейные и диаметральные размеры прессовок измерялись штангенциркулем с электронным отсчётным устройством с точностью 0,01 мм. Таким образом, относительная плотность прессовок, полученная в результате эксперимента, на 23 % превышает нижнюю оценку теоретической плотности.

Интересным является вопрос о возможных причинах аномальных значений кажущейся плотности образцов из порошков с добавками меди. К очевидным причинам могут относиться: наличие более плотных примесей в составе порошковых композиций, погрешности в измерениях массы компонентов при подготовке смеси, погрешности в измерении массы и размеров полученных образцов.

Порошок графита, использованный в композиции, представляет собой отходы электродного производства, подвергнутые шаровому размолу, до получения требуемого гранулометрического состава. В отходах могут содержаться металлические включения, а при шаровом размоле в порошок неизбежно попадают металлические частицы от шаров мельницы. Однако кажущаяся плотность прессовки, полученная в результате экспериментов без добавления меди [6], совпадет с ожидаемой и составляет 87 % от теоретической плотности исходной композиции. На основании этого можно сделать вывод о незначительном влиянии примесей металлов на теоретическую плотность смеси.

Если предположить, что при высокоскоростном формовании [6] композиции графит-медь-ФФС получаемые значения плотности составляют 90 %

от теоретической плотности исходной композиции, тогда теоретическая плотность композиции должна составлять 2944 кг/м^3. Такая теоретическая плотность может быть получена по формуле (2), если при постоянном содержании ФФС 14 % мас., графита в композиции будет 34 % мас., меди – 52 % мас. Данное процентное соотношение в составе композиции не может быть получено в рамках погрешности измерения массы компонентов.

Таким образом, рассмотренные очевидные причины плохо объясняют аномальные значения теоретической плотности, полученные в эксперименте.

Менее очевидными причинами аномальных значений плотности прессовок могут являться фазовые превращения в графите в присутствии меди как катализатора, внедрение порошка меди в структуру графитового наполнителя и частичное отверждение ФФС. Для проверки этих предположений необходимо детально исследовать микроструктуру и химический состав полученных прессовок.

Библиографический список

1. Трофимов, А.Н. Контактные вставки токосъемников троллейбусов / А.Н. Трофимов. – М.: Строительство, 1966. – 140 с.

2. Берент, В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта / В.Я. Берент. – М.: Интертекст, 2005. – 405 с.

3. Грешман, И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих электрических контактов: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04: защищена 18.02.06: утверждена 15.09.06 / Гершман Иосиф Сергеевич. – М., 2006. – 234 с. – Библиогр.: с. 214–228. – 71:06-5/547.

4. Ивин, К.В. Повышение надежности и качества токосъема троллейбуса / К.В. Ивин. – М.: Транспорт, 1980. – 72 с.

5. Седов, Л.И. Механика сплошной среды: учеб. для вузов по специальности «Механика»: в 2 т. / Л. И. Седов; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. – СПб.: Лань, 2004. – Т. 1. – 528 с.

6. Самодурова, М.Н. Статическое и высокоэнергетическое формование углеродных порошковых композиций / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов, Б.А. Яров // Металлург. – 2011. – № 11. – С. 87–91.

УДК. 669.017.1

ПОСТРОЕНИЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ СТАЛИ МАРКИ 80 С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА Gleeble 3800

Л.В. Радионова, М.И. Гасленко, А.М. Ахмедьянов

Дилатометрическим методом с помощью комплекса Gleeble 3800 построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали марки 80 и проанализировано влияние скорости охлаждения на её структуру.

Ключевые слова: Gleeble 3800; сталь марки 80; термокинетическая диаграмма

Высокоуглеродистые марки конструкционной стали используются при изготовлении пружин, высокопрочной арматуры, канатов и металлокорда. Устойчивая тенденция к повышению прочности изделий при снижении их массы диктует необходимость производителям переходить на марки стали с повышенным содержанием углерода. Традиционно используемые для данных видов продукции марки стали 65, 70, 75 уступают место стали марок 80, 85 и даже 90. В связи с этим представляет большой практический интерес построение термокинетических диаграмм высокоуглеродистых конструкционных марок стали полученных на современном металлургическом оборудовании.

В настоящей работе проведены дилатометрические исследования для определения критических точек с помощью комплекса Gleeble 3800 и построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали марки 80.

В качестве исследуемой стали была выбрана катанка диаметром 10 мм производства ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”, сорбитизированная с прокатного нагрева на мелкосортном проволочном стане 170. Химический состав исследуемой стали приведен в табл.1. Образцы длиной 84 мм специальным образом изготавливались в соответствии с эскизом, приведенным на рис. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали, %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	As	N
0,801	0,293	0,51	0,004	0,006	0,086	0,054	0,041	0,016	0,002	0,002	0,003	0,003	0,006

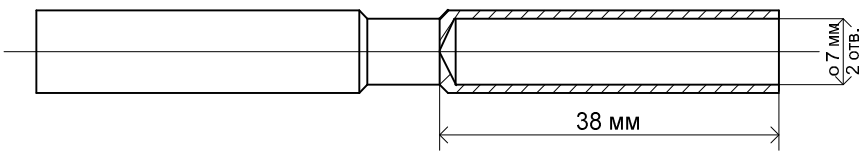


Рис. 1. Эскиз исследуемого образца

Торцевые отверстия необходимы для высокоскоростного охлаждения водой в процессе испытания. К исследуемым образцам приваривалась хромель-алюмелевая термопара (рис. 2). Исследуемые образцы помещались в медные захваты модуля Pocket Jaw (рис. 3) и нагревались в вакууме до температуры 720 °С со скоростью 3 °С/с, а затем до 930 °С со скоростью 0,8 °С/с после чего осуществлялась выдержка в течение 1 мин для гомогенизации аустенита. Охлаждение образцов, как с подачей воды, так и только теплоотводом в медные захваты в зависимости от исследуемой скорости охлаждения. Охлаждение образцов осуществлялось со скоростями 94, 50, 35, 20, 10 и 1 °С/с.

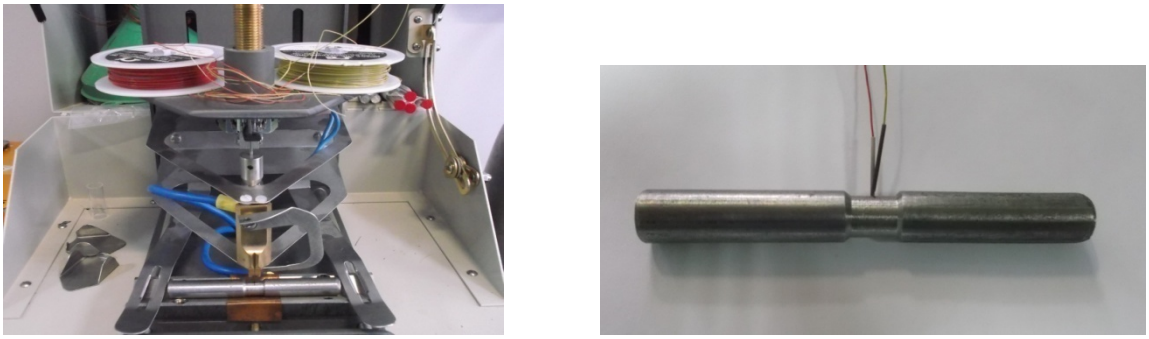


Рис. 2. Припайка термопары к образцу

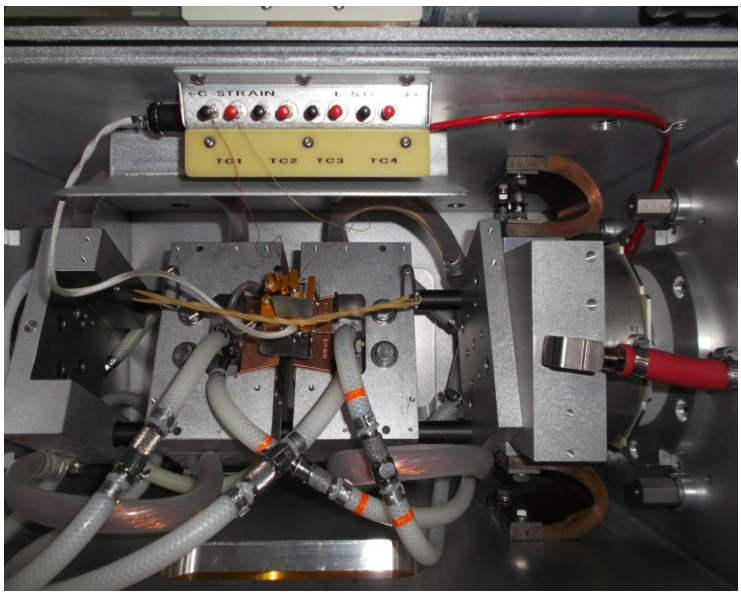
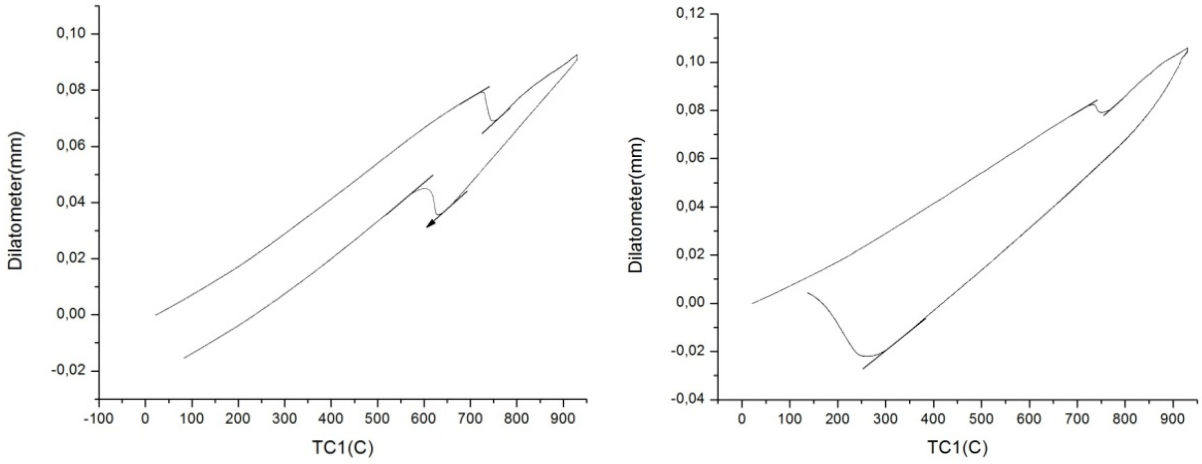


Рис. 3. Размещение исследуемого образца
в медных захватах модуля Pocket Jaw

Температуры превращений определялись по перегибам на дилатометрических кривых методом касательных (рис. 4). Температуры критических точек исследуемой стали представлены в табл. 2. При нагреве начало превращения соответствовало температуре 721, а конец – 763 °С.



а) б)

Рис. 4. Дилатограммы исследуемой стали при скоростях охлаждения:
а – 10 °С/с; б – 94 °С/с

Таблица 2

Критические точки стали марки 80 при непрерывном охлажднении

Скорость охлаждения, °С/с	Температура превращения, °С				
	Нагрев		Охлаждение		
	начало	конец	начало	конец	Мн*
94	721	769	–	–	294
50	720	761	558	527	277
35	720	763	610	481	261
20	721	764	606	553	–
10	721	760	641	572	–
1	722	764	676	647	–

* Температура начала мартенситного превращения.

По результатам испытаний построена термокинетическая диаграмма (рис. 5). Полученные результаты сопоставлялись с изменениями микроструктуры стали. Для исследования микроструктуры образцы разрезались в месте приварки термопары. Шлифы, полученные с поперечного сечения образцов, подвергались травлению в 4 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Исследования микроструктуры образов осуществлялись на оптическом микроскопе Axio Observer при увеличении в 500 и 1000 крат. Измерения микротвердости проводили на приборе FM-800. Исследование микроструктуры и микротвердости подтвердили результаты, полученные при исследованиях на комплексе Gleeble 3800 (рис. 6).

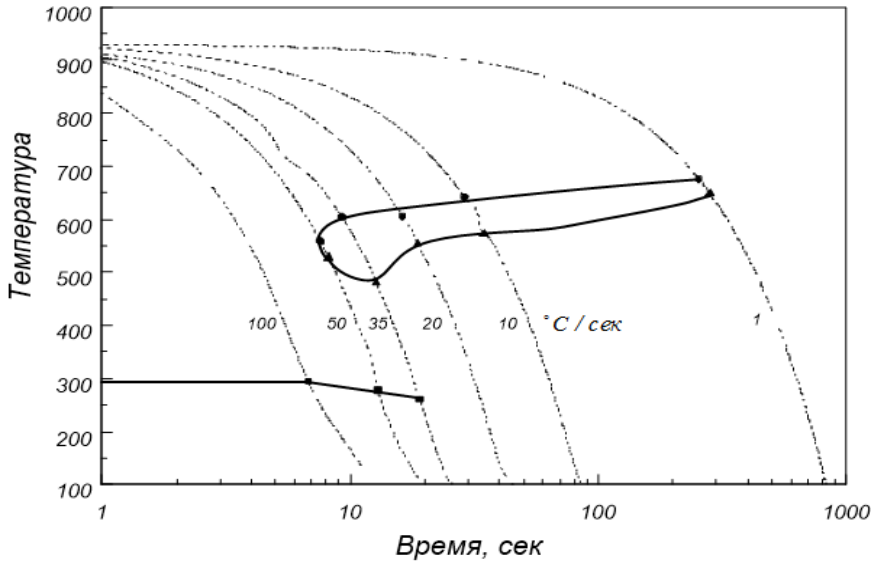
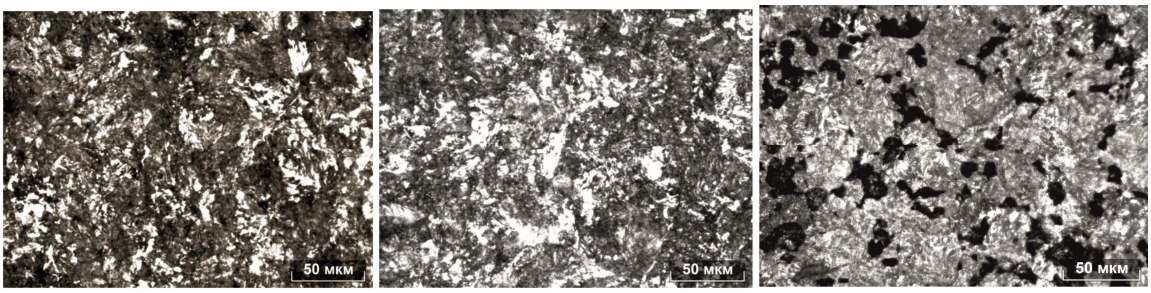


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма стали марки 80



а) б) в)

Рис. 6. Микроструктура и твердость стали после охлаждения с различными скоростями: а – 1 °С/с, 327 HV; б – 10 °С/с, 402 HV; в – 50 °С/с (777 HV – светлые; 440 HV – темные

Таким образом, полученная с помощью испытательного комплекса Gleeble 3800 термокинетическая диаграмма стали марки 80 позволяет определить оптимальные и скорректировать существующие режимы термической обработки, что положительно отразиться на качестве и конкурентоспособности готовой продукции. Кроме того, следует отметить, что полученная термокинетическая диаграмма, отличается от диаграмм, приведенных в справочнике [1], что может объясняться существенными изменениями в технологиях выплавки стали, прокатки и т. д. Поэтому, продолжение работ по построению термокинетических диаграмм современных сталей является весьма актуальным.

Библиографический список

1. Попов, А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: справочник термиста / А.А. Попов, А.Е. Попова. – Машгиз, 1961. – 430 с.

УДК 621.771.28

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ТРУБ НА КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Е.В. Храмков, А.В. Выдрин

По результатам проведенных исследований и физического моделирования процесса прокатки на стане FQM ОАО «СТЗ» установлены возможные дефекты поверхности труб, уровень качества геометрических характеристик получаемых труб. Показана необходимость изменения калибровки, которую планируется использовать на данном стане.

Ключевые слова: физическое моделирование, калибровка, трехвалковый стан, экспериментальная установка.

Повышение конкурентных преимуществ на рынке трубной продукции требует глубокого и детального анализа процессов ее изготовления и эксплуатации. Результаты такого анализа дают базу для совершенствования процессов изготовления труб, обеспечивающих снижение издержек производства и выпуск продукции с уникальными наборами потребительских свойств. В то же время, поиск путей по совершенствованию и оптимизации технологических процессов в современном мире невозможен без широкого применения высоких технологий. К таким технологиям, в частности, можно отнести технологии физического и математического моделирования с применением современных компьютеризированных экспериментальных установок и программных продуктов для численного анализа физических процессов, протекающих при производстве продукции.

Для совершенствования технологии прокатки труб на действующих трубопрокатных агрегатах и изучения особенностей деформирования металла на трубопрокатных агрегатах еще не введенных в эксплуатацию целесообразно перед промышленным опробованием проводить экспериментальные исследования на основе методов физического моделирования. Для этого в ОАО «РосНИТИ» разработан, и смонтирован универсальный комплекс оборудования для исследования процессов продольной прокатки труб (ЭУ-ППТ) с компьютеризированным сбором и обработкой информации [1]. Для расширения возможностей фактического использования ЭУ-ППТ с целью моделирования процесса непрерывной прокатки труб в трехвалковых клетях на оправке разработаны соответствующие методики и рабочий инструмент. С помощью физического моделирования исследовалась технология процесса прокатки на стане FQM, планируемом к пуску в ОАО «СТЗ».

При выборе масштабов моделирования определяющим фактором становиться диаметр и калибровка валков промышленного стана, геометрические размеры гильзы, а также идеальный диаметр и ширина бандажа лабораторного стана.

Сопоставимость результатов физического моделирования с промышленными рассматривается на примере раскатки гильзы ∅328×23,7 мм в первой клети стана FQM в ОАО «СТЗ» при прокатке труб ∅291×17,47 мм в калибре 291 мм.

Ширина рабочей части валка (обжимная зона, выпуска, галтели) первой клети промышленного стана равна 160 мм, максимальная ширина рабочей части экспериментального стана равна 40 мм, т. е. коэффициент моделирования равен 0,1838. Схема калибра клети представлена на рис. 1.

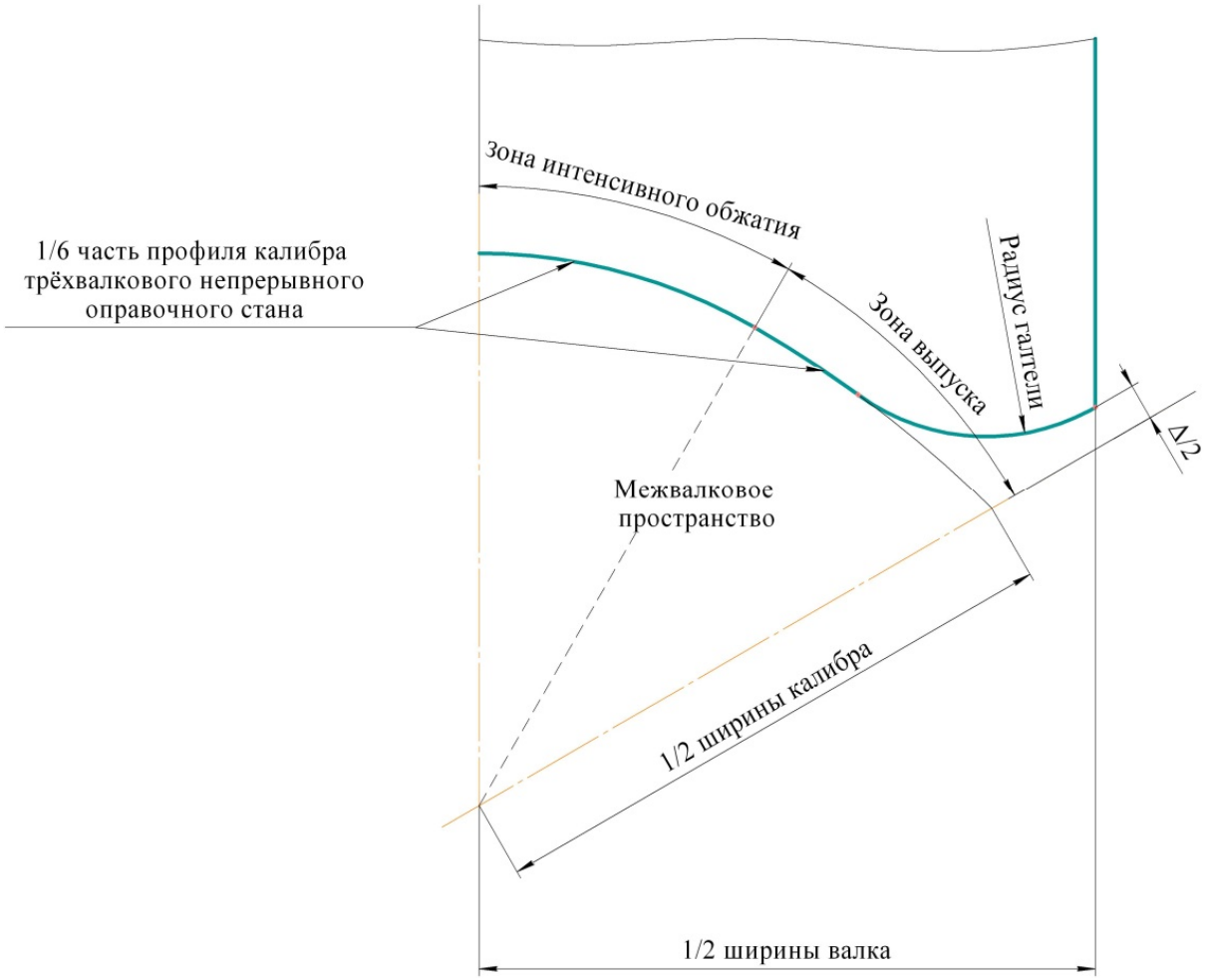


Рис. 1. Схема 1/6 части калибра первой клети трехвалкового непрерывного оправочного стана (Δ/2 – половина величины зазора между валками)

Проведение экспериментальных исследований в трёхвалковом калибре на ЭУ-ПППТ для условий стана FQM позволяет определить следующие параметры:

– формоизменение раската в очаге деформации при прокатке труб с использованием различных калибров и диаметров оправки;

– влияние степени обжатия и калибровки валков для каждой клети промышленного стана на заполнение калибров, точность раската, «оков» оправки;

– выбор оптимальной системы калибров непрерывного стана, с точки зрения качества проката, для конкретного ТПА;

– условия захвата;

– определение фактического коэффициента вытяжки по клетям непрерывного стана и т. п.

С учетом масштабного коэффициента подобия определены размеры инструмента, разработана калибровка валков для лабораторной установки. На стане FQM планируется прокатывать трубы при температуре 1220 °С. Как показано в источнике [2] хорошим модельным материалом для нагретой стали является свинец. Поэтому на лабораторной установке использовались свинцовые трубные заготовки. Для получения достоверных результатов также учитывается скоростной режим прокатки.

Проведенное моделирование прокатки труб на стане FQM ОАО «СТЗ» в лабораторных условиях ОАО «РосНИТИ» можно считать достоверным, так как разница в диаметре, толщине стенки и вытяжки натуры и модели, пересчитанной с масштабным коэффициентом, не превышает 10 %. В связи с этим появление дефектов и отклонений, наблюдавшееся в ходе экспериментального исследования, возможно в условиях реальной прокатки на стане FQM.

Так среднее квадратичное отклонение по толщине стенки готовой трубы при прокатке в заданной калибровке составляло 0,06 мм при среднем значении толщины стенки 1,31 мм, разностенность готовой трубы – 19 %.

Рис. 2. Дефект на прокатанной заготовке

Также при прокатке трубных заготовок во всех проходах наблюдалось переполнение калибров. Переполнение калибров вызвано с одной стороны отсутствием натяжения заготовки между клетями, с другой – самой системой калибровки, наличие уширения в которой наблюдается при графическом построении калибра. Причем фактическое уширение заготовок $B_{рф}$ меньше уширения полученного графическим способом $B_{рп}$. Помимо этого на прокатанных образцах имеются дефекты в виде подрезов (рис. 2), что объясняется значительным переполнением калибра.

Также имеется разброс значений толщины стенки прокатанных образцов. В основном максимальный разброс наблюдается между значениями толщины стенки в вершине калибра и в выпуске, что также является следствием переполнения калибра.

Библиографический список

1. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И.Ю. Пышминцев, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др. // Труды международной научно-технической конференции «ТРУБЫ-2009». – Челябинск: ООО «Полиграф-мастер», 2009. – С. 328–331.

2. Baines, K. Lead as a model material to simulate mandrel rolling of hot steel tube / K. Baines // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118. – P. 422–428.

УДК 548.55

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ $BaFe_{12}O_{19}$:Co, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ РАСТВОРА

***Д.А. Винник*[1], *Л.С. Машковцева*[1], *Д.М. Галимов*[1], *А.С. Семисалова*[2]**

[1] Южно-Уральский государственный университет, кафедра физической химии,

[2] Московский государственный университет им. Ломоносова, кафедра магнетизма

Выращены кристаллы феррита бария, легированного кобальтом. Проведены исследования их поверхности, структуры и магнитных свойств.

Ключевые слова: ферриты бария, монокристаллы, выращивание из расплава.

Благодаря своим уникальным физическим свойствам ферриты в настоящее время широко используются в самых различных отраслях промышленности: радио- и микроэлектротехнике, электронике, вычислительной технике, автомобильной промышленности и др. Среди них имеются как магнитномягкие, так и магнитнотвердые материалы. Среди данных материалов широкое распространение получил бариевый феррит.

Хорошо известно, что частичное замещение элементов феррита может кардинально менять его свойства. Вторым значительным фактором, определяющим свойства, является технология получения.

Существует множество различных методов [1–4] получения монокристаллических оксидов, но большинство из них имеет существенный недостаток: они позволяют синтезировать образцы микроразмеров [5]. Однако, несмотря на высокое качество синтезируемых веществ (отсутствие примесей и дефектов), для удовлетворения производственных потребностей необходимо получать монокристаллы макроразмеров. Известен метод выращивания из раствора [6]. Наличие растворителя позволяет существенно понизить температуру гомогенизации шихты, а значит, снизить нагрузку на тепловой узел. Кроме того, представляет особый интерес получение легированных ферритов М-типа и изучение влияния легирующих элементов на магнитные свойства синтезируемых образцов [7, 8].

В представленной работе были получены кристаллы феррита бария, легированного кобальтом. О синтезе монокристаллов нелегированного феррита бария можно подробнее прочесть в работе [9]. Для создания легированных кристаллов феррита бария были использованы оксиды железа и кобальта, а также карбиды бария и натрия в соотношениях, представленных ниже. Общая масса навески составила 20 г.

$Fe_2O_3 - 62,4515\,\%$ $\quad$ $CoO - 5\,\%$

$Na_2CO_3 - 18,642\,\%$ $\quad$ $BaCO_3 - 13,8965\,\%$

Состав и структура полученных образцов были исследованы на электронном микроскопе Jeol JSM7001F с энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа. Количественный состав полученных монокристаллов представлен в таблице.

Состав монокристаллов феррита бария $BaFe_{12}O_{19}:Co$

Ион	O	Fe	Co	Ba
Массовая доля, %	25,45	51,13	8,66	14,75

Рентгеноструктурный анализ полученных кристаллов проводился в диапазоне углов от 16 до 120° со скоростью 50,74 с/шаг. Шаг сканирования составил 0,013°. Для исследования кристаллы были перетёрты до состояния мелкодисперсного порошка. Анализ спектров проведен с использованием программного обеспечения Пан Аналитикал. Порошки гексаферрита бария были нанесены тонким слоем на подложку из монокристаллического кремния. Подготовленные к съемке образцы представлены на рис. 1.

Рис. 1. Снимок мелкодисперсного порошка феррита бария

Полученная в результате исследований типичная рентгенограмма приведена на рис. 2.

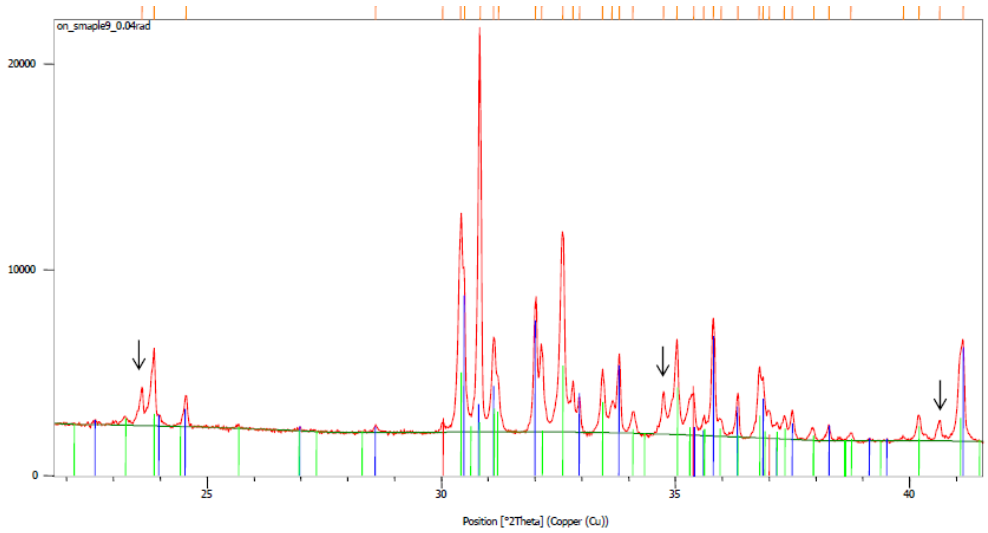
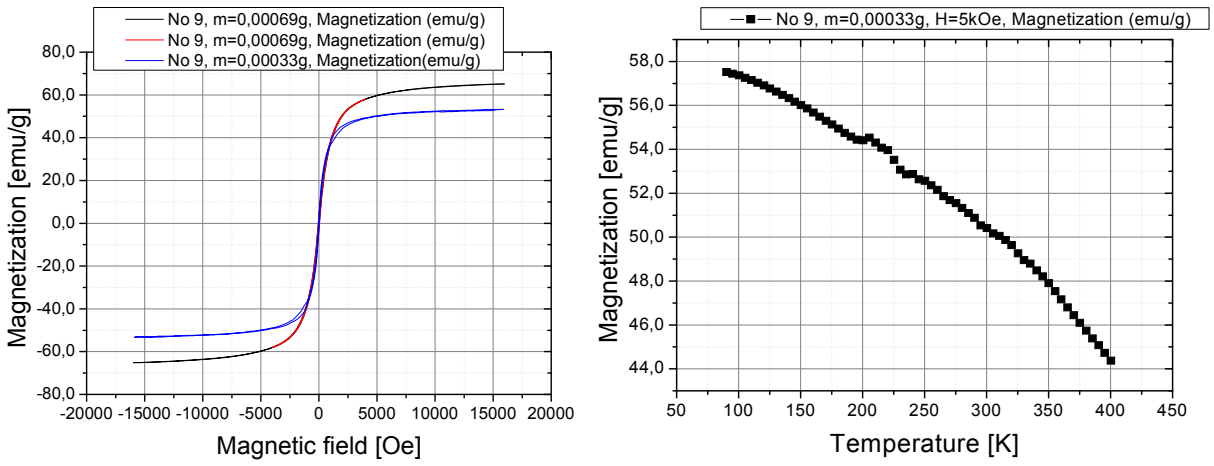


Рис. 2. Рентгенограмма исследуемых образцов

Были обнаружены преимущественные фазы в полученных образцах легированного кобальтом гексаферрите бария – $Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$ и $Ba_3Co_{1,4}Fe_{24,6}O_{41}$, а также был присутствие оксида железа Fe_3O_4.

Измерения магнитных свойств были проведены на вибрационном магнитометре VSM LakeShore 7407 в полях до 16 кЭ. Образцы представляли собой объемные материалы в виде кусочков неправильной формы. Массу определяли с помощью электронных весов с разрешением до 10 мкг. Для исследований были отобраны два образца массой 0,69 mg и 0,33 mg. На рис. 3, а приведены графики зависимостей удельной намагниченности от напряженности магнитного поля. Как видно из рисунка, зависимости имеют характерную форму петли гистерезиса с малой коэрцитивной силой, хотя бариевые ферриты являются типичным представителем сильно коэрцитивных материалов.

Температурная зависимость намагниченности была измерена при нагреве от 80 до 400 К в магнитном поле напряженностью 5 кЭ. На рис. 3, б представлены результаты для образца № 2 массой 0,33 mg. С ростом температуры наблюдается снижение величины намагниченности. Наблюдаемая в области 200 – 225 К немонотонность, возможно, связана с фазовым переходом в оксиде железа. Поскольку намагниченность при 400 К составила 44 emu/g, можно сделать вывод, что температура Кюри данного материала существенно превышает комнатную и может быть сравнима с температурой Кюри нелегированного гексаферрита $BaFe_{12}O_{19}$ [10].



а) б)

Рис. 3. График зависимости удельной намагниченности от величины внешнего поля (а), от температуры (б)

Коллектив авторов выражает благодарность специалисту PANalytical (Алмело, Нидерланды) О. Нариджина за помощь в работе и активное сотрудничество.

Библиографический список

1. Mallick, K.K. Dielectric properties of M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation / K.K. Mallick, P. Shepherd, R.J. Green // Journal of the European Ceramic Society – 2010. – Vol. 27, no. 4. – P. 2045–2052.

2. Synthesis and magnetic properties of barium-calcium hexaferrite particles prepared by sol-gel and microemulsion techniques / R.B. Jotania, R.B. Khomane, C.C. Chauhan et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008. – Vol. 320. – P. 1095–1101.

3. Barium ferrite powders prepared by microwave-induced hydrothermal reaction and magnetic property / T. Yamauchi, Y. Tsukahara, T. Sakata et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2009. – P. 8011.

4. Li, Y. Synthesis, characterization and magnetic properties on nanocrystalline BaFe12O19 ferrite / Y. Li, Q. Wang, H. Yang // Current Applied Physics – 2009. – Vol. 9 – P. 1375–1380.

5. Study of Sr and Ba Hexaferrite Prepared by Low Temperature Auto-Compustion Method / V. Jancarik, A. Gruskova, J. Slama, R. Dosoudil // Journal of Electrical Engineering – 2006. – Vol. 57 – P. 163–166.

6. Gambino, R.J. Growth of Barium Ferrite Single Crystals / R.J. Gambino, F. Leonhard // Journal of the American Ceramic Society – 1961. – Vol. 44, no. 5 – P. 221–224.

7. The Influences of Nb_2O_5, MnO_2, CuO and B_2O_3 Addition on the Magnetic Properties of $BaFe_{12}O_{19}$ Magnets / E.G. Coker, N. Yetgin, E. Yildiz et al. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism – 2013. – Vol. 26 – P. 1011–1014.

8. Temperature and Orientation Effects of the Magnetic Properties of Doped Barium Ferrite Thin Films / J. Li, R. Sinclair, S.S. Rosenblum, H. Hayashi // IEEE Transactions of Magnetics – 1994. – Vol. 30. – P. 4050–4052

9. Получение кристаллов феррита бария из раствора / Л.С. Машковцева, Д.А. Винник, Д.А. Жеребцов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2011. – Вып. 17, № 36. – С. 41–44.

10. Pullar, R.C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / R.C. Pullar // Progress in Materials Science – 2012. – Vol. 57 – P. 1191–1334.

УДК 548.55

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ $BaFe_{12}O_{19}$, ЛЕГИРОВАННЫХ Ni, Cr, Al

Д.А. Винник[1], Л.С. Машковцева[1], Е. В. Еремин[2], Д.М. Галимов[1]

[1] Южно-Уральский государственный университет, кафедра физической химии,

[2] Институт физики имени Л.В. Киренского СО РАН, Лаборатория радиоспектроскопии и спиновой электроники

Представлены результаты исследования образцов легированных монокристаллов феррита бария.

Ключевые слова: феррит бария, выращивание из раствора, легирование.

Вещества, проявляющие электромагнитные свойства всегда были интересны для нужд научных и технических разработок. Они получили применение в электронике, машиностроении, производстве сенсоров и датчиков. Среди веществ с нетривиальными магнитными свойствами особое место занимают ферриты бария. Среди достоинств данного вещества можно назвать высокую температуру Кюри, одноосную магнитную анизотропию и химическую стабильность [1]. Наиболее важное применение они имеют в микроволновых устройствах и в качестве магнитных материалов для хранения и воспроизводства информации [2, 3]. На сегодняшний день ферриты бария получают множеством способов: золь-гель технологиями [4], соосаждением [5], процессом индуцированного микроволнового излучения [6] и другими. При этом, не смотря на то, что современные методы позволяют получать вещества достаточно высокого качества, большинство из них позволяют получать образцы микроразмеров.

О получении нелегированного феррита бария можно узнать из работ [7, 8]. В представленной работе были синтезированы кристаллы легированного феррита бария методом выращивания из раствора. С этой целью были проведены три серии экспериментов, где в исходную шихту были добавлены легирующие элементы по 5 % мас.: Cr_2O_3, Al_2O_3, NiO. Состав исходной шихты в мас.% без учёта допирующих элементов приведён ниже. Общая масса навески составила 20 г.

$Fe_2O_3 - 62,4515\ \%$

$Na_2CO_3 - 18,642\ \%$

$BaCO_3 - 13,8965\ \%$

Исследования поверхности полученных образцов проводились на электронном растровом микроскопе Jeol JSM7001F с энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа. Содержа-

ние легирующих примесей в монокристаллах гексаферрита бария приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание легирующих примесей в образцах

Тип легирующего	Концентрация, мас. %
Cr	0,3
Al	0,7
Ni	0,5

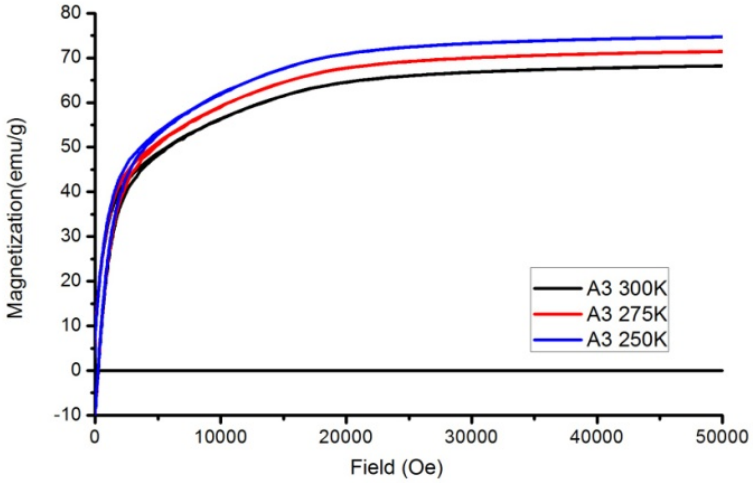
Для изучения магнитных свойств образцы легированного гексаферрита бария были тщательно перетерты в агатовой ступе, затем спрессованы в таблетки. Измерения полевых зависимостей проводили на вибрационном магнитометре на базе PPMS для трёх значений температур: 250, 275 и $300\,\text{К}$. Скорость развертки составляла $20\,\text{Э/с}$ при $2\,\text{кЭ}$ и $100\,\text{Э/с}$ для значений напряжённости магнитного поля от 2 до $50\,\text{кЭ}$. Полученные данные приведены в табл. 2, где M_n – намагниченность насыщения, M_o – остаточная намагниченность, H_c – коэрцитивная сила.

Таблица 2

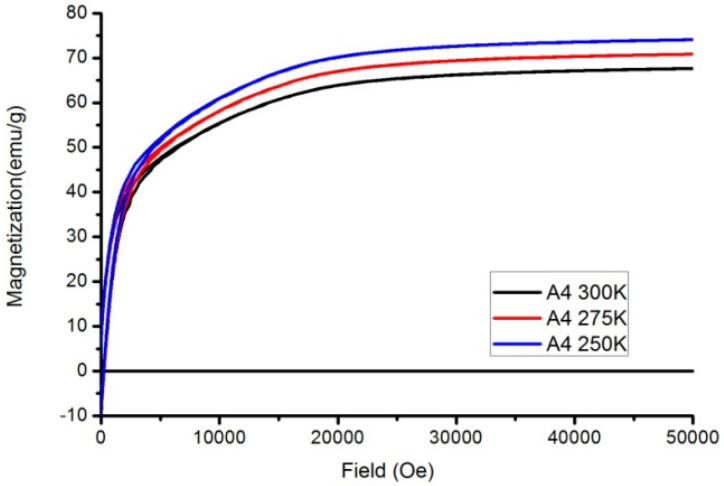
Данные магнитных свойств

	300 К			275 К			250 К		
	M_n, emu/g	M_o, emu/g	H_c, Oe	M_n, emu/g	M_o, emu/g	H_c, Oe	M_n, emu/g	M_o, emu/g	H_c, Oe
Cr	65,6	9,12	232	69	8,88	228	72	8,53	225
Al	65	8,8	236	68,2	8,55	227	71,56	8,01	221
Ni	23,6	2,82	242	24,7	2,7	232	25,9	2,88	221

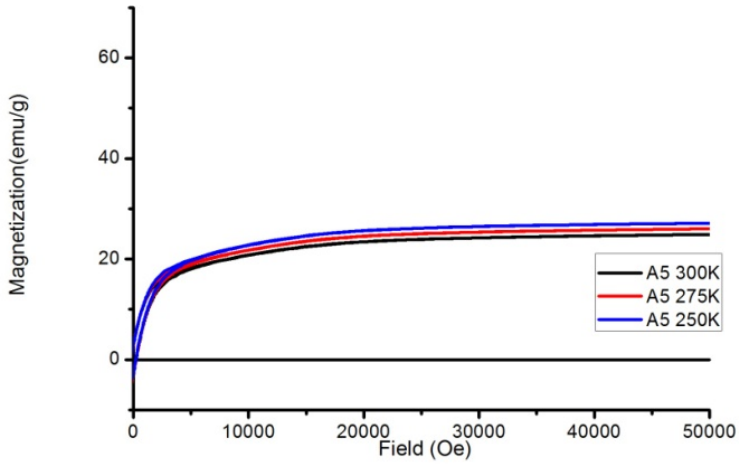
В результате исследования магнитных свойств образцов было обнаружено, что кривая намагниченности имеет типичную форму петли гистерезиса, характерную для ферромагнетика. На рис. 1 приведены графики зависимостей намагниченности от величины внешнего магнитного поля для различных значений температур и различных легирующих элементов (верхние кривые на каждом графике соответствуют температуре $250\,\text{К}$, средние – $275\,\text{К}$, нижние – $300\,\text{К}$). Следует отметить сильное влияние никеля на магнитные характеристики исследуемого порошка.



а)



б)



в)

Рис. 1. Графики зависимости удельной намагниченности от величины внешнего поля для кристаллов, легированных Cr (а), Al (б) и Ni (в)

Библиографический список

1. Geok, B.T. Preparation and studies of Co(II) and Co(III)-substituted barium ferrite prepared by sol–gel method / B.T. Geok, S. Nagalingam, D.A. Jefferson // Materials Chemistry and Physics. – 2007. – No. 101. – P. 158–162.

2. Ultra large coercivity in barium ferrite thin films prepared by magnetron sputtering / W. Zhang, B. Peng, W. Zhang et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2010. – No. 322. – P. 1859–1862.

3. Properties of barium hexa-ferrite thin films dependent on sputtering pressure / H. Xu, W. Zhang, B. Peng, W. Zhang // Applied Surface Science. – 2011. – No. 257. – P. 2689–2693.

4. Formation and characterization of magnetic barium ferrite hollow fibers with high specific surface area via sol-gel process / F. Song, X. Shen, M. Liu, J. Xiang // Solid State Sciences. – 2010. – No. 12. – P. 1603–1607.

5. Liu, Y. Preparation and magnetic properties of barium ferrites substituted with manganese, cobalt, and tin / Y. Liu, M.G.B. Drew, Y. Liu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2011. – No. 323. – P. 945–953.

6. Fua, Y.-P. Barium ferrite powders prepared by microwave-induced combustion process and some of their properties / Y.-P. Fua, C.-H. Lin, K.-Y. Pan // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – No. 364 – P. 221–224.

7. Gambino R. J. Growth of Barium Ferrite Single Crystals / R. J. Gambino, F. Leonhard // Journal of the American Ceramic Society. – 1961. – Vol. 44, no. 5 – P. 221–224.

8. Получение кристаллов феррита бария из раствора / Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, Д.А. Жеребцов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2011. – Вып. 17, № 36 – С. 41–44.

УДК 548.3

ВЫРАЩИВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТИТАНАТА СВИНЦА

Д.А. Винник, О.С. Колодкина, Д.А. Жеребцов, В.Г. Захаров

В данной статье описана методика выращивания легированных монокристаллов титаната свинца раствор-расплавным методом. Приведены данные рентгеноструктурного анализа и электронного микроскопа. Приведено обсуждение полученных результатов, в частности зависимость изменения параметров ячейки титаната свинца от легирующего элемента.

Ключевые слова: титанат свинца, выращивание из раствора, легирование.

Введение

Пьезокристаллы используются во многих радиотехнических приборах: стабилизаторах частот, генераторах ультразвуковых колебаний и других. Иногда им приходится работать в условиях повышенных температур [4, 2].

Современные технические требования к пьезокристаллам очень высоки, особенно касающиеся размеров кристаллов и плотности дефектов в них. Поскольку в природных кристаллах редко удается найти участки оптического качества, в технике все более и более используются искусственные кристаллы. Из различных оптических свойств пьезоэлектриков в технике ценятся: прозрачность, двупреломление, поляризующие свойства и т. д.

Титанат свинца используется при изготовлении элементов акустоэлектронных, оптоэлектронных и запоминающих устройств, а также в технике СВЧ и дефектоскопии.

В данной статье описан процесс получения легированных монокристаллов титаната свинца раствор-расплавным методом.

Экспериментальная часть

В качестве исходных компонентов шихты использовали оксид титана TiO_2, оксид свинца PbO, оксид бора B_2O_3 и оксид легирующего компонента.

На основе анализа литературных данных было установлено, что оптимальным растворителем является смесь оксидов свинца и бора [3]. Добавление последнего уменьшает испарение PbO, что обеспечивает более стабильное кристаллообразование титаната свинца в растворе.

Выращивание монокристаллов вели в платиновом тигле объемом 40 мл в фехралевой печи на воздухе из раствора методом спонтанной кристаллизации. Все компоненты смеси имели квалификацию «ОСЧ» и были пере-

терты в агатовой ступке. Шихту выдерживали при температуре 1000 °С в течение 2 ч с целью ее гомогенизации. Для регулирования температуры использовали прецизионный ПИД-регулятор РИФ-101, термопару ПР-30/6. Охлаждение вели со скоростью 4 °С/ч до температуры 925 °С.

Для получения легированных образцов титаната свинца в исходную шихту добавляли 5 мол. % оксидов легирующих элементов. Масса навески составляла 120 г.

В результате серии экспериментов были получены кристаллы размером 2–5 мм. Цвет кристаллов от бледно до темно-желтого. Все кристаллы, исключая легированные ионами ниобия, имели характерный для титаната свинца габитус – прямоугольную форму (рис. 1). Кристаллы, содержащие ионы ниобия, имели треугольную форму и ярко-оранжевый цвет (рис. 2).

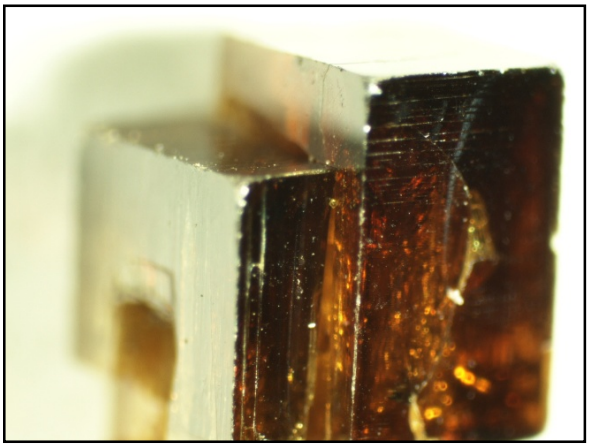


Рис. 1. Образцы титаната свинца, легированного ионами Cd

Рис. 2. Образцы титаната свинца, легированного ионами ионами Nb

Данные рентгеноструктурного анализа образцов подтверждают тетрагональную структуру $PbTiO_3$. Рентгенограммы представлены на рис. 3. Исключением является эксперимент с добавлением оксида ниобия. В данном эксперименте основной является фаза дефицитного по кислороду пирохлора состава $Pb_2Ti_2O_6$ с ниобием в твердом растворе. Рентгенограмма представлена на рис. 4.

Твердых растворов легирующих компонентов с титанатом свинца $PbTiO_3$ не обнаружено. Это обусловлено низкими концентрациями легирующих катионов.

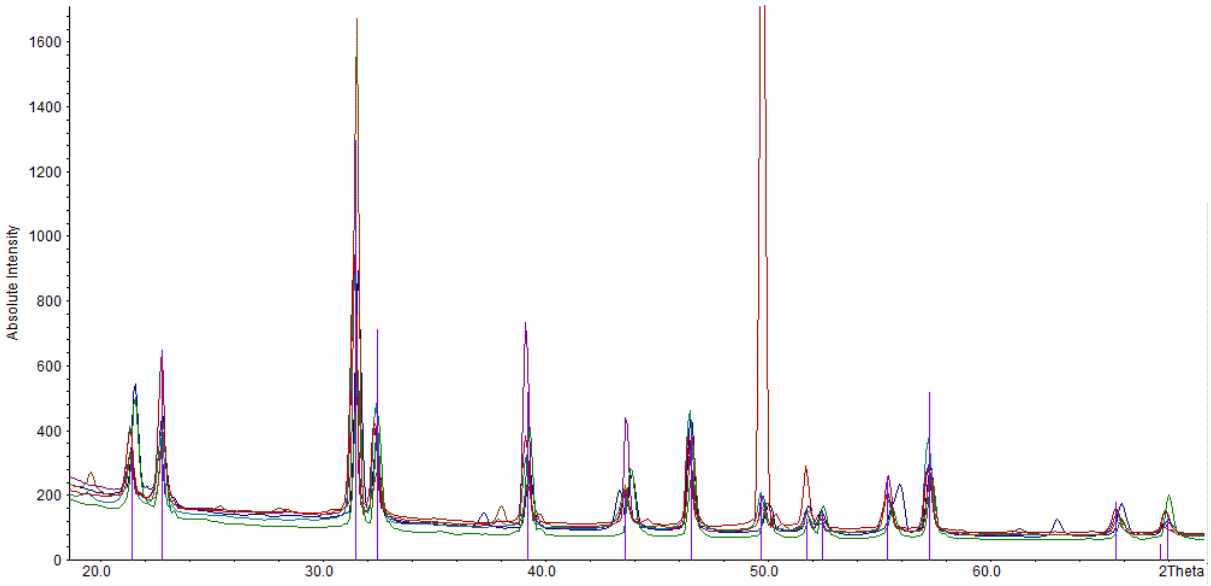


Рис. 3. Рентгенограммы титаната свинца

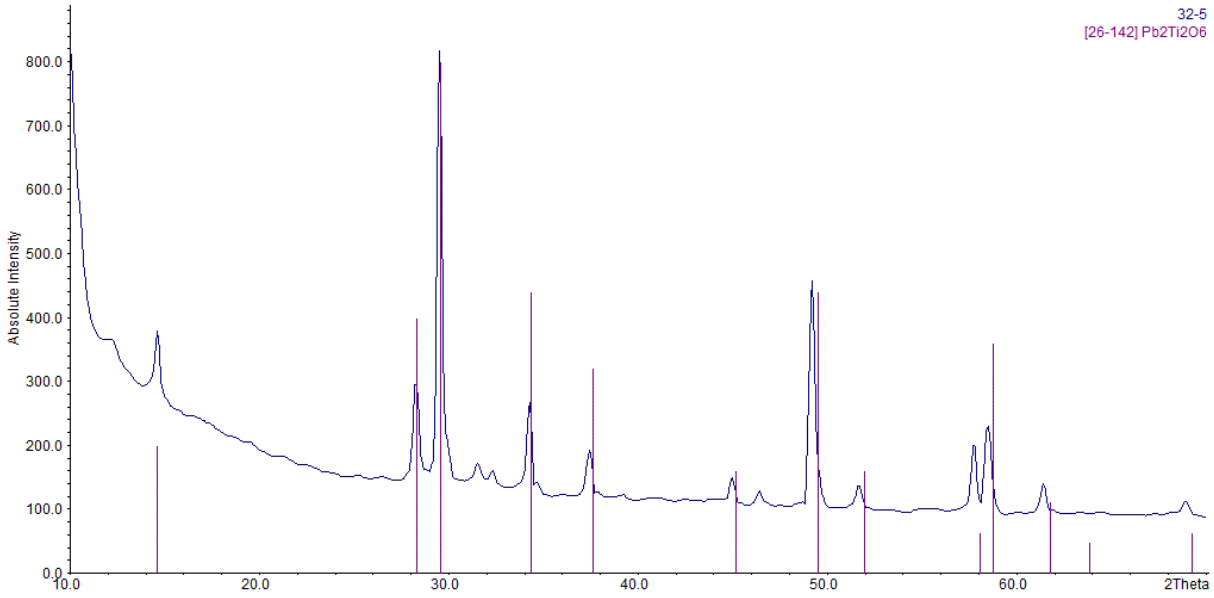


Рис. 4. Рентгенограмма пирохлора состава $Pb_2Ti_2O_6$

Из табл. 3 и 4 видно, что нет четкой зависимости между размером катиона легирующего элемента и изменением параметров решетки. Это обусловлено разницей концентраций легирующего катиона. Однако можно сделать вывод, что во всех полученных образцах титаната свинца параметры решетки отличаются от литературных данных для чистого титаната свинца в меньшую сторону.

Таблица 3

Параметры ячеек легированных образцов

Легирующий элемент	Концентрация в кристалле, мас. %	a, A	c, A	V, A^3	Радиус атома, A (по Гольшмидту)
Ni	0,47	3,9000(5)	4,1206(10)	62,675(15)	0,79
Co	0,49	3,8971(4)	4,1361(5)	62,816(9)	0,74
Si	0,24	3,8960(11)	4,1461(17)	62,934(24)	0,40
Zn	0,54	3,8976(3)	4,1475(6)	63,005(8)	0,74
Mn^{+2}	3,06	3,8966(6)	4,1281(11)	62,680(16)	0,83
Mn^{+4}	1,77	3,8975(11)	4,1263(19)	62,68(3)	0,52
Nb	12,42	10,4469(14)	10,4469(14)	1140,2(3)	0,64
Ca	1,21	3,8917(5)	4,1479(8)	62,821(11)	1,00
Cu	0,34	3,8950(12)	4,1462(13)	62,90(3)	0,73
Cr	0,41	3,8946(20)	4,118(3)	62,46(9)	0,61
Cd	0,1	3,8952(6)	4,1481(7)	62,937(14)	0,95

Таблица 4

Параметры ячеек титаната свинца (литературные данные)

a, A	c, A	V, A^3	Источник
3,905	4,156	63,375	Glazer A.M.; Mabud S.A. Powder profile refinement of lead zirconate titanate at several temperatures, II, Pure PbTiO3 Locality: synthetic Sample: T = 25 C Acta Crystallographica, Section B 34 (1978) 1065–1070
3,899	4,167	63,348	Glazer A.M.; Mabud S.A. Powder profile refinement of lead zirconate titanate at several temperatures, II, Pure PbTiO3 Locality: synthetic Sample; T = –115 C Acta Crystallographica, Section B 34 (1978) 1065–1070

Библиографический список

1. Density functional theory (DFT) investigation on the structure and electronic properties of the cubic perovskite $PbTiO_3$ / Huizhi Lv, Hongwei Gao, Yue Yang, Lekun Liu // Applied Catalysis A: General, Vol. 404, Iss. 1–2, 19 Sept. 2011, P. 54–58.

2. Тарасенко, В.М. Популярная библиотека химических элементов марганец-олово / В.М. Тарасенко. – М.: Наука, 1972. – 320 с.

3. Тамашпольский, Ю.Ю. // Кристаллография / Ю.Ю. Тамашпольский, Ю.Н. Веневцев, Г.С. Жданов. – 1968. – № 13. – 521 с.

4. Петрянов-Соколов, И.В. // Популярная библиотека химических элементов Кн. 1: Водород-палладий / И.В. Петрянов-Соколов. – Изд. 3. – М.: Наука, 1983. – 575 с.

УДК 544.34

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФАЗ В СИСТЕМАХ $FeO–SiO_2$ и $Al_2O_3–SiO_2$

В.Н. Власов, Т.С. Трофимова, Е.Д. Крапачева

Методом комплексного моделирования данных о высокотемпературных фазовых равновесиях и термодинамических свойствах фаз определены термодинамические характеристики компонентов в системах $FeO–SiO_2$ и $Al_2O_3–SiO_2$, установлены концентрационные и температурные зависимости термодинамических функции образования расплавов. На основе полученных данных проведен расчет равновесных диаграмм фазовых равновесий систем $FeO–SiO_2$ и $Al_2O_3–SiO_2$, определены термодинамические параметры плавления сложных химических соединений.

Ключевые слова: фазовые равновесия; термодинамические характеристики фаз; оксидные расплавы, фаялит, муллит.

Система $FeO–SiO_2$. Сведения о строении фазовой диаграммы этой системы и термодинамических характеристиках ее фаз представляют значительный интерес для металлургов. К настоящему времени установлено присутствие в системе одного устойчивого сложного соединения – фаялита (Fe_2SiO_4), двух эвтектик и наличие широкой области расслоения жидкой фазы на две несмешивающиеся жидкости концентрационные и температурные границы которой четко не определены. Термодинамические характеристики чистых компонентов системы (FeO и SiO_2) установлены достаточно точно и отражены в профессиональных справочниках. Свойства фаялита исследованы недостаточно и характеризуются существенными расхождениями и неполнотой. Термодинамические свойства расплавов исследованы, ограничено, они представлены экспериментальными данными об активности в них FeO, полученными в исследованиях Дистина с сотр., Филиппова, Бодсворда, Шумана и др. Сводка указанных данных содержится в работе [1]. Данные о концентрационных зависимостях энтальпии и энтропии образования расплавов из чистых жидких компонентов в литературе отсутствуют.

Система $Al_2O_3–SiO_2$. Сведения о фазовых равновесиях в этой системе и термодинамических свойствах ее фаз в настоящее время весьма актуальны. Они необходимы для понимания особенностей протекания высокотемпературных процессов в оксидных системах, представляют существенный интерес для современных плазменных технологий, технологий направленного синтеза керамических материалов, производства специальных защитных покрытий и носителей для катализаторов.

В литературе описано около десятка вариантов диаграммы состояния системы Al_2O_3–SiO_2 [2]. Считающийся наиболее достоверным вариант диаграммы базируется на результатах исследований Торопова, Арамаки, Сторонки, Шорникова. Данные, полученные в этих работах, свидетельствуют о присутствии в системе при высоких температурах одного устойчивого соединения – муллита ($Al_6Si_2O_{13}$) и двух эвтектик. Несмотря на согласованность общего вида диаграммы, между результатами указанных исследований наблюдаются заметные расхождения в результатах определения температуры плавления муллита и координат эвтектик.

Термодинамические характеристики корунда хорошо изучены. Данные о свойствах муллита из-за серьезных трудностей его экспериментального исследования в основном получены косвенными методами и не считаются достаточно надежными. Вследствие высоких температур плавления твердых фаз и большого различия в летучести компонентов (приводящего к быстрому изменению состава системы) в настоящее время отсутствуют надежные данные о термодинамических характеристиках расплавов.

Целями данной работы являлись: 1) проведение комплексного моделирования экспериментальных данных о фазовых равновесиях и термодинамических свойствах фаз исследуемых систем; 2) получение согласованных наборов термодинамической информации об этих системах; 3) построение путем термодинамического расчета равновесных диаграмм состояния систем, отражающих их строение в широкой области изменения составов и температур.

Методика проведения комплексного моделирования фазовых равновесий и термодинамических свойств фаз описана в работе [3]. Наиболее вероятные значения термодинамических характеристик твердых фаз исследуемых систем характеризуют данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические характеристики твердых фаз

Вещества	$-\Delta H^o_{298}$, кДж/моль	S^o_{298}, Дж/моль·К	$C_p = a + b\cdot T + c/T^2$, Дж/моль К			$T_{пл.}$, К	$\Delta H_{пл}$, кДж/моль
			a	$b\cdot 10^3$	$c\cdot 10^{-3}$		
FeO	267,927	60,333	48,207	9,295	0	1650	33,02
SiO_2	911,239	41,873	56,758	15,326	–14,970	2001	7,59
Al_2O_3	1677,074	51,175	106,053	17,093	–28,802	2324	89,54
Fe_2SiO_4	1480,433	146,050	169,424	31,290	–39,208	–	–
Al_6SiO_{13}	6823,34	252,867	470,088	56,491	–144,42	–	–

В качестве базовой информации при моделировании свойств системы FeO–SiO_2 использовались координаты точек на линиях фазовых равновесий вюстит-расплав и фаялит-расплав, отвечающие результатам исследований Боуэна и Шерера и Аллена и Сноу, данные об активностях FeO в расплавах, полученные в исследованиях Шумана и Энсио, Бодсворда, Дистина с сотр. и Филиппова с сотр. При моделировании свойств системы

Al_2O_3–SiO_2 использовались точки на диаграмме состояния, отвечающие местам пересечения линий ликвидуса, проведенных по результатам исследований фазовых равновесия в работах Сторонки с сотр. и Шорникова. Описание термодинамических характеристик жидких фаз производилось на основе обобщенной модели оксидных расплавов [4]. В результате проведения комплексного моделирования были получены согласованные базы термодинамической информации, характеризующие свойства твердых и жидких фаз исследуемых систем – данные табл. 1–3, уравнения функций.

Таблица 2

Термодинамические характеристики расплавов системы FeO–SiO_2

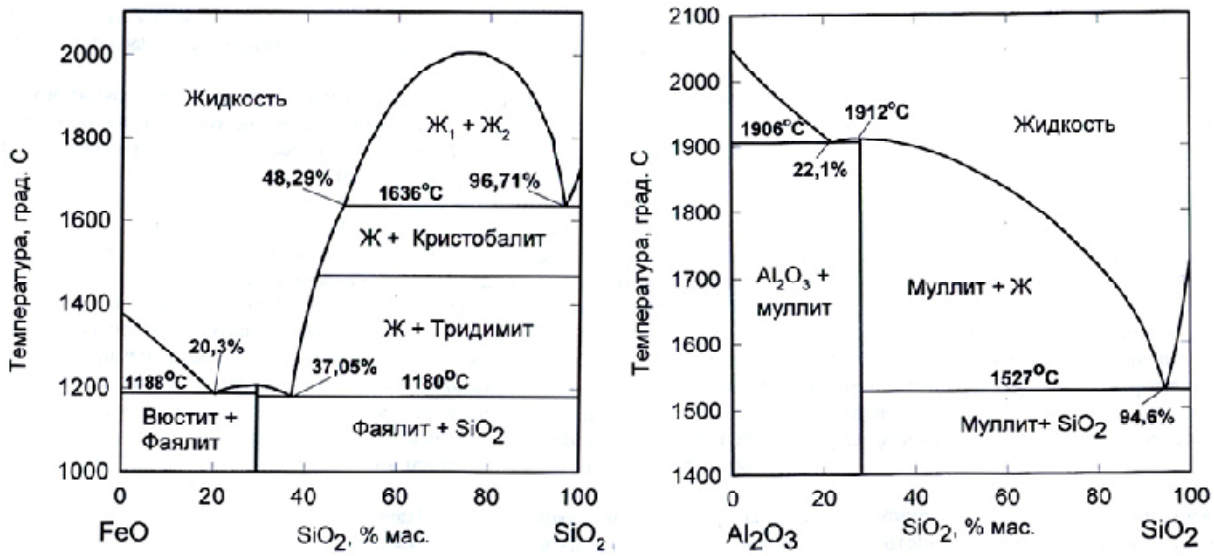
Термодинамические функции	Значение функции при мольной доле SiO_2 в расплаве						
	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
ΔH, кДж/моль	0	–0,874	–1,516	1,686	7,858	6,653	0
ΔS, Дж/(моль·К)	0	2,165	3,825	5,205	6,538	4,325	0
ΔS^E, Дж/(моль·К)	0	–0,537	–1,254	–0,558	1,459	1,623	0
$\Delta \overline{H_1}$, кДж/моль	0	–0,21	–1,44	–14,21	–6,96	44,44	93,27
$\Delta \overline{H_2}$, кДж/моль	–10,96	–6,86	–1,70	17,58	14,21	2,45	0
$\Delta \overline{S_1^E}$, Дж/(моль·К)	0	–0,060	–0,537	–5,229	–4,241	9,903	23,93
$\Delta \overline{S_2^E}$, Дж/(моль·К)	–5,97	–4,836	–2,925	4,113	3,902	0,703	0

Таблица 3

Термодинамические характеристики расплавов системы Al_2O_3–SiO_2

Термодинамические функции	Значение функции при мольной доле SiO_2 в расплаве						
	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
ΔH, кДж/моль	0	–3,203	–4,312	1,088	9,808	11,014	0
ΔS, Дж/(моль·К)	0	0,608	1,590	4,465	8,236	7,591	0
ΔS^E, Дж/(моль·К)	0	–2,649	–4,996	–3,473	0,777	3,254	0
$\Delta \overline{H_1}$, кДж/моль	0	–0,88	–7,86	–18,84	–17,75	57,96	182,65
$\Delta \overline{H_2}$, кДж/моль	–40,76	–24,11	3,97	21,02	21,62	5,80	0
$\Delta \overline{S_1^E}$, Дж/(моль·К)	0	–0,483	–4,466	–11,58	–15,34	11,41	62,51
$\Delta \overline{S_2^E}$, Дж/(моль·К)	–31,25	–22,15	–6,23	4,63	7,682	2,348	0

На основе этих данных в результате проведенных термодинамических расчетов были построены равновесные диаграммы состояния для систем FeO–SiO_2 и Al_2O_3–SiO_2, вид которых отражен на рисунке.



Диаграммы состояния систем $FeO–SiO_2$ и $Al_2O_3–SiO_2$

В результате выполненных расчетов определены термодинамические параметры плавления сложных соединений. Для фаялита температура плавления равна 1207 °С (1480 К), энтальпия плавления $\Delta H_{пл}$ = 89,8 кДж/моль. Для муллита температура плавления равна 1912 °С (2185 К), $\Delta H_{пл}$ = = 238 кДж/моль.

Библиографический список

1. Selleby, M. An Assessment of the Fe–O–Si System / M. Selleby// Metallurgical and Materials Transactions. – Aug. 1997. –Vol. 28B. – P. 563–569.

2. Стрелов, К.К. Диаграмма состояния системы $Al_2O_3–SiO_2$ / К.К. Стрелов, И.Д. Кащеев // Огнеупоры. – 1995. – № 8. – С. 11–14.

3. Власов, В.Н. Высокотемпературные фазовые равновесия и термодинамические свойства расплавов в системе $CaO–SiO_2$ / В.Н. Власов, Е.А. Мамонтова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2005. – Вып. 6, № 10 (50). – С. 21–26.

4. Власов, В.Н. К термодинамике жидких металлургических шлаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2004. – Вып. 4, № 8 (37). – С. 3–8.

УДК 544.77.023.5, 544.77.022.82

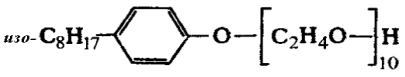
УГЛЕРОДНЫЙ КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ФУРФУРИЛОВОГО СПИРТА В ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ С УЧАСТИЕМ ТРИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ И ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА

Д.М. Галимов, Д.А. Жеребцов

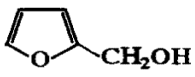
Из дисперсной системы с участием солей металлов, фурфурилого спирта, поверхностно-активного вещества и триэтиленкгликоля получены композитные углеродные материалы, допированные частицами металлов. Полученные материалы исследованы методами СЭМ, рентгеноструктурного анализа, а также методами измерения адсорбционных свойств.

Ключевые слова: углеродный материал, матричный синтез, композит

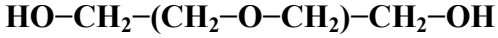
Фундаментальное и прикладное значение имеют материалы, содержащие наночастицы ферромагнетиков, поскольку магнитные свойства таких материалов значительно отличаются от свойств тех же материалов в массивной (компактной) форме. Также, для практического применения в качестве катализаторов представляют интерес углеродные материалы с распределенными в них наночастицами металлов [1, 2]. Для исследования влияния условий синтеза на свойства получаемого углеродного материала согласно результатам предварительных экспериментов, была выбрана тройная система на основе фурфурилового спирта (ФС), триэтиленгликоля (ТЭГ) и полиэтилен-10-гликолевого эфира изооктилфенола ($C_8H_{17}C_6H_4O[C_2H_4O]_{10}H$) (далее ОП-10 – широко используемое в промышленности поверхностно-активное вещество), модифицированная металлами. Формулы ФС, ТЭГ и ОП-10 представлены на рис. 1.



а)



б)

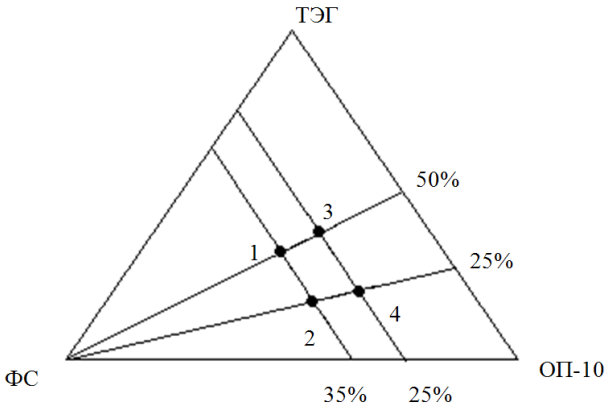


в)

Рис. 1. Формулы ОП-10 (а), фурфурилового спирта (б), триэтиленгликоля (в)

Для исследования на треугольнике составов ФС-ОП-ТЭГ, в соответствии с рис. 2, были избраны 36 составов для синтеза образцов с добавками соединений меди, никеля, железа и кобальта. Для синтеза наночастиц Co, Fe, Ni и Cu применялись растворимые соединения этих металлов, способные войти в гомогенный раствор на основе системы ФС-ОП-10-ТЭГ. Количество каждого раствора рассчитывалось таким образом, чтобы в его состав входило 10 г ФС, который после цепочки превращений приведет к об-

разованию из каждого образца по 6 г стеклоуглеродного материала. Точный состав образцов контролировался по массе компонентов.



ФС–(50 % ТЭГ + 50 % ОП);
ФС–(25 % ТЭГ + 75 % ОП).

Рис. 2. Схема сетки составов органических компонентов образцов, мас. %. Цифры соответствуют четырем группам образцов с добавками различных металлов

В каждой из четырёх точек были синтезированы по одному образцу без металлов и по 8 образцов с растворами солей. Навески раствора ОП-10 и ТЭГ помещались в предварительно взвешенные пластиковые стаканчики, к ним добавляли по 10 г ФС, перемешивали. К составам, соответствующим образцам № 2–9, 11–18, 20–27, 28–36 добавлялись растворы солей Fe, Co, Ni и Cu: $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ и $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ в количестве, соответствующем 0,5 и 2,0 мас. % металла в расчете на массу прокаленного углеродного образца, с учетом выхода 6 г стеклоуглерода из 10 г ФС. Затем в растворы добавляли по 1 мл соляной кислоты для катализа реакции поликонденсации ФС. Применение таких условий приводило к практически одновременному превращению ФС в полимер во всех образцах с окрашиванием растворов в темные цвета.

После добавления кислоты образцы подвергали интенсивному перемешиванию. В результате через 5–10 минут растворы приобретали темно-коричневый с зеленоватым отливом цвет и быстро густели. Это обусловлено началом образования олигомеров после растекания нескольких капель катализатора по поверхности. В течение двух дней все образцы приобрели одинаковый черно-коричневый цвет. Картина расслоения растворов при поликонденсации (сопровождающейся выделением воды) отразилась на макро- и микроструктуре стеклоуглеродных материалов.

После того, как образцы полимеризовались при комнатной температуре, их подвергали сушке в сушильном шкафу при T = 60 °С, T = 90 °С, T = 130 °С, T = 160 °С, T = 180 °С и при T = 200 °С – с выдержкой при каждой температуре в течение 7 часов. В результате сушки при 200 °С были получены твердые образцы черно-коричневого цвета.

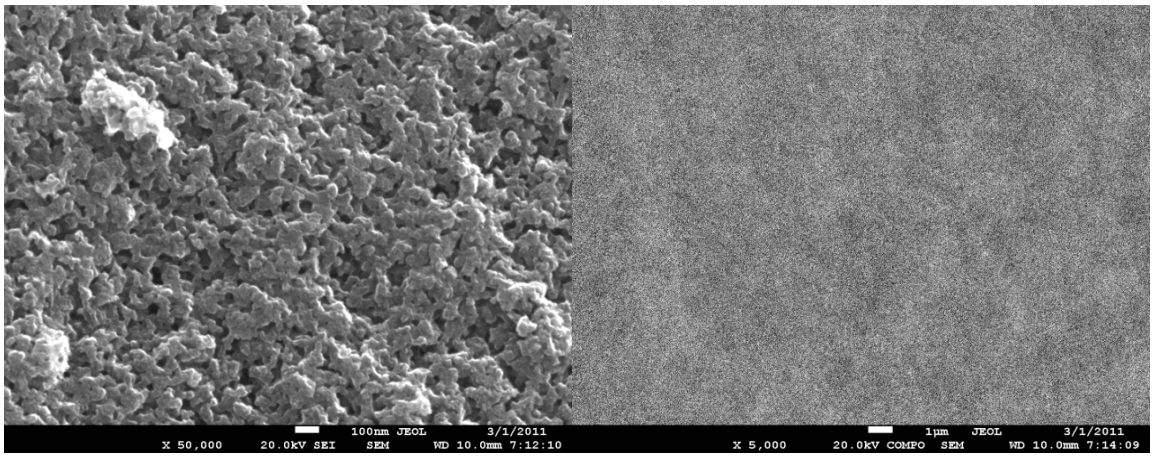
Просушенные образцы далее нагревались в печи в засыпке из сажи (в тигле с лабиринтным затвором) со скоростью около 50 °С/ч до Т = 970 °С и прокаливались при этой температуре в течении часа в восстановительной атмосфере, создаваемой сажевой засыпкой.

Для исследования структуры стеклоуглеродных материалов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) образцы раскалывались в агатовой ступе, после чего на электропроводную подложку наклеивались их фрагменты размером до 5 мм, свежим сколом вверх. Некоторые изображения образцов, полученные после прокаливания представлены на рис. 3. Минимальный размер наблюдаемых структурных образований в полученных образцах составляет 50 нм. Образцы имеют строение в виде связанной трехмерной сетки из капель полимера, превращенного при обжиге в стеклоуглерод. Увеличение введения ТЭГ способствует уменьшению размера капель эмульсии полимера и увеличению удельной площади поверхности стеклоуглеродных материалов после обугливания, измеряемой по величине адсорбции бензола. В образцах композитного углеродного материала наблюдаются металлические и оксидные включения округлой или ограненной равноосной формы диаметром 0,02–3 мкм. Равномерное распределение частиц металлов размером менее 150 нм в монолитной части образца позволяет предположить заметную растворимость соединений металлов в органической фазе, что привело при прокаливании к восстановлению их до металла в нанодисперсном состоянии.

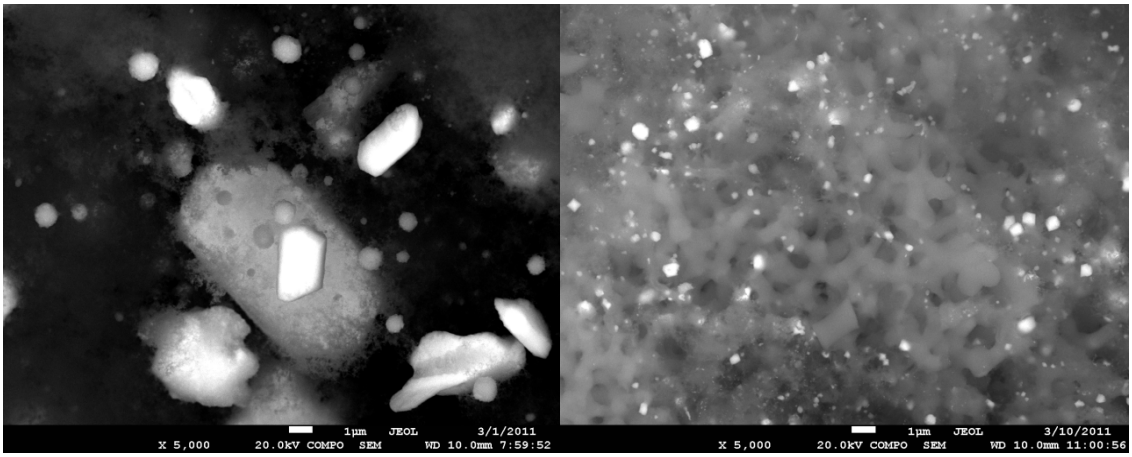
Из сравнения структуры образцов следует, что введение солей металлов в раствор не приводит к заметным изменениям характера структурных единиц стеклоуглеродных материалов по сравнению с образцами без добавок металлов.

По электронно-микроскопическим измерениям с помощью сканирующего электронного микроскопа, полученные углеродные материалы могут быть отнесены к мезопористым композитным наноматериалам [3]. Данные адсорбции бензола свидетельствуют о наличии пор размером менее 100 нм. По данным рентгеновской дифрактометрии можно сделать вывод, что оксиды металлов в виде частиц 1–10 мкм при 970 °С и выдержке длительностью 1 ч не полностью восстанавливаются до металла.

Таким образом, проведен синтез углеродных материалов при полимеризации и прокаливании составов в системе на основе фурфурилового спирта, ПАВ (ОП-10) и триэтиленгликоля с добавлением солей металлов. Полученные углеродные материалы отнесены к мезопористым наноматериалам (размер пор менее 50 нм), обнаружено равномерное образование частиц Fe, Co, Ni и Cu и их окислов размером от 20 нм до 5 мкм в углеродной матрице.



а) б)



в) г)

Рис. 3. Изображения СЭМ образцов, полученные после прокаливания: образец № 1, без добавок металла (а, б); образец № 2, 0,5 мас. % Fe (в); образец № 3, 2,0 мас. % Fe (г)

Библиографический список

1. Kopelevich, Y. Ferromagnetism and Superconductivity in Carbon-based Systems / Y. Kopelevich, P. Esquinazi // Journal of Low Temperature Physics. – 2007. – P. 146.

2. Chung, D.D.L. Electrical applications of carbon materials / D.D.L. Chung // J. Materials Science. – 2004. – P. 2645–2661.

3. Kyotani, T. Control of pore structure in carbon / T Kyotani // Carbon. – 2000. – P. 269–286.

УДК 621.74:669.71

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ НА ОПЫТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЧТЗ-УРАЛТРАК

И.Н. Ердаков, А.А. Хохлов, М.В. Фадеева, Л.Д. Кадухина

Исследована технология литья алюминиевых сплавов на реальном производстве в условиях ЧТЗ-Уралтрак и сделаны рекомендации по её совершенствованию.

Ключевые слова: литье, алюминиевые сплавы

Обеспечение конкурентоспособности предприятия и его продукции в рыночных условиях возможно только на базе новейших достижений науки и техники через модернизацию, техническое перевооружение и реконструкцию действующих производства [1–14].

Особую актуальность проблема качественного развития отечественных предприятий приобрела с вхождением Российской Федерации во Всемирную торговую организацию. В этих условиях обоснованность и продуманность технической политики российской промышленности становятся определяющими факторами их успешного функционирования.

Одним из доказательств продуманной политики Правительства РФ является результат выигрыша тендера на разработку нового семейства двигателей, который был объявлен в 2008 году Министерством промышленности и энергетики РФ. Правительство подписало с ЧТЗ-Уралтрак государственного контракта «Создание модельного ряда дизельных двигателей жидкостного охлаждения».

Разработка конкурентоспособной «линейки» дизельных двигателей завершилась в конце 2012 года с демонстрацией на московском «Агросалон» одного из представителей челябинской «четверки» двигателя 4Т 371. Этот двигатель разработан на перспективные тракторы Т-1К и Т-1П, для использования в промышленности и сельском хозяйстве [15].

Анализируя литейные технологии с позиции серийного изготовления перспективных дизельных двигателей, можно придти к выводу, что без технического перевооружения соответствующих производств, включая и опытное литье, завод не сможет выпускать современную конкурентоспособную технику.

Исследуем участок опытного алюминиевого литья ЧТЗ-Уралтрак, план представлен на рисунке, и выделим три основных момента, требующих анализа:

1) энергоэффективная подготовка расплава;
2) рациональное формообразование;
3) эффективная термическая обработка отливок.

Поскольку ООО «Азиатские Промышленные Технологии» зарекомендовала себя в качестве ведущей компании в России и странах СНГ, осуществляющей поставку металлургического оборудования из Китая, то в качестве плавильного агрегата выберем индукционную печь марки GWLJ [16].

Индукционные печи марки GWLJ отличаются сниженными энергозатратами при расплавлении металла, быстротой плавки отходов и мелкой шихты, возможностью выравнивания температуры во всем объеме плавильной ванны, и отсутствием локальных перегревов шихты.

Один из мировых лидеров в области производства формовочного оборудования для ХТС-процессов признана компания Omega Foundry Machinery Ltd (Англия). Более 95 % изготавливаемого компанией «Omega» оборудования поставляется на экспорт в более чем 60 стран мира [17].

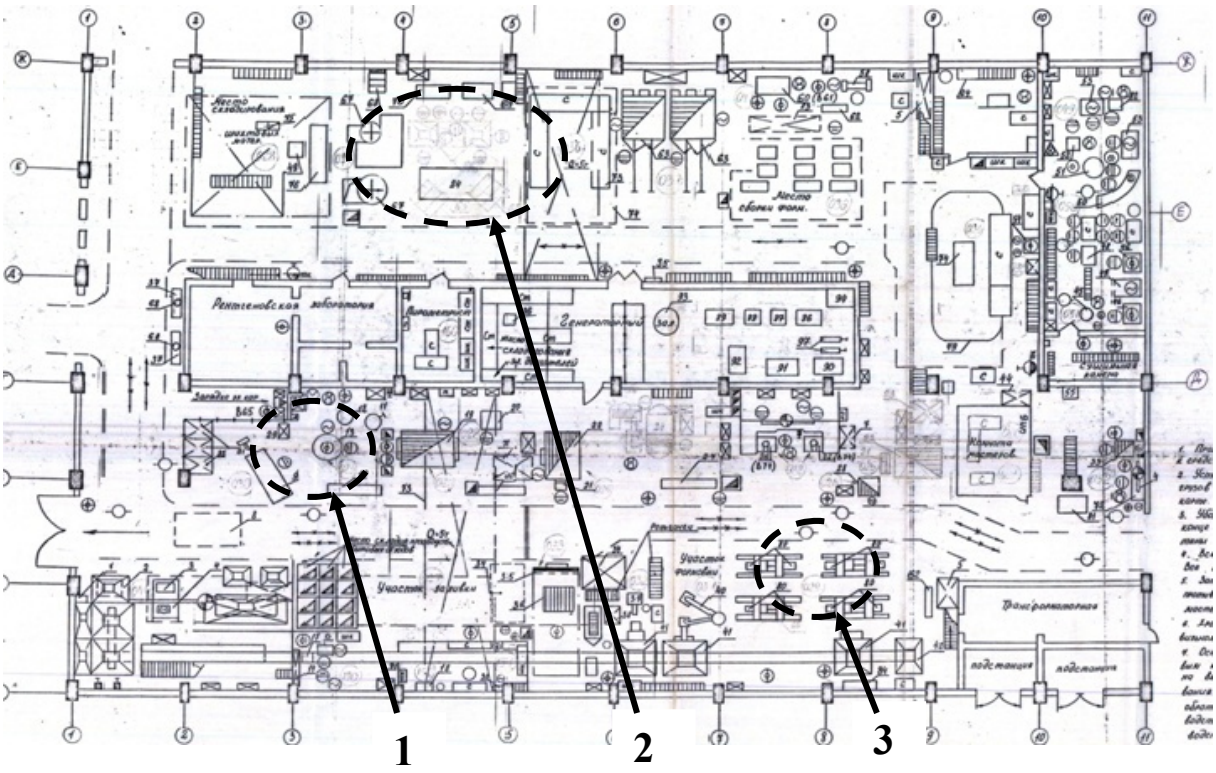
Смесители непрерывного действия «Omega» для приготовления холодно-твердеющих смесей обладают усовершенствованной системой смешивания, подачи связующего и катализаторов, что обеспечивает стабильное высокое качество смеси. Смесители серий Spartan II и Spartan III отличаются более высокой скоростью приготовления смеси.

Учитывая преимущества формовочного оборудования компании «Omega», выберем однорукавный высокоскоростной смеситель серии Spartan II в комплекте с вибростолом и механизмом протяжки. В качестве процесса формообразования выберем Pep-set.

Фирма REMIX S. A. существует на рынке с 1990 года. Она была создана в форме простого товарищества, а в 1999 году была преобразована в акционерное общество и стала одним из ведущих в Польше производителем высококачественного оборудования для термической обработки металлов и плавильных печей [18].

Главное достоинство печей фирмы REMIX S. A. связано с широкой гаммой выпускаемого оборудования для термической и термохимической обработки, начиная от простых, стандартных камерных, колодезных, муфельных и проходных печей и заканчивая сложными, полностью автоматизированными технологическими линиями. Оборудование используется в процессах закалки, науглероживания, цианирования, азотирования, отжига, отпуска, нагрева перед ковкой и штамповкой. Печи для термической обработки могут работать с дополнительным оборудованием, образуя технологические линии термической обработки [18].

По расчету [19] на годовой объем производства 27 тонн отливок из силумина получилось по одной единицы рассматриваемого оборудования. Вводимое оборудование целесообразнее всего разместить в местах, указанных на рисунке: 1 – индукционная печь; 2 – формовочное оборудование; 3 – печь для термообработки.



План участка опытного алюминиевого литья ЧТЗ-Уралтрак

В заключении следует отметить, что серийное производство современных конкурентоспособных дизельных двигателей на перспективные тракторы Т-1К и Т-1П, для использования в промышленности и сельском хозяйстве, не возможно без технического перевооружения соответствующих производств тракторного завода, включая и опытное литье силуминов.

Библиографический список

1. Дибров, И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства в России / И.А. Дибров // Литейщик России. – 2011.– № 9.– С. 9–15.

2. Дибров, И.А. Связь литейной науки с производством в современных условиях / И.А. Дибров // Литейщик России. – 2010.– № 7.– С. 14–16.

3. Евсеев, В.И. Реализация структурных проектов – путь развития машиностроения и литейного производства / В.И. Евсеев, А.А. Ищенко // Умное производство. – 2009. – № 8. – С. 47–52.

4. Евсеев, В.И. Литейщики – автопрому. XII Международный промышленный форум «Российский промышленник» / В.И. Евсеев // Петербург в зеркале. – 2008. – № 4. – С. 22.

5. Евсеев, В.И. Инновационная деятельность и проблемы литейного производства комплектующих изделий для автомобильной промышленности. Конференция в рамках XII Международного промышленного форума «Российский промышленник-2008», 22–24 сентября 2008 года / В.И. Евсеев, А.А. Ищенко // Литейное производство. – 2008. – № 8. – С. 39–42.

6. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве / И.Н. Ердаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». − 2012. − Вып. 18, № 39. – С. 139–141.

7. Ердаков, И.Н. Критерий оптимизации литейных процессов / И.Н. Ердаков // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. – Вып. 11. – С. 195–197.

8. Ердаков, И.Н. Технология производства высококачественных литых деталей из алюминиевых сплавов / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. – Вып. 12 – С. 97–100.

9. Иванов, М.А. Влияние технологических параметров литья изложниц на их стойкость / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2004. – Вып. 4, № 8 (37). – С. 103–106.

10. Развитие теории трещиноустойчивости отливок / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Е.Л. Волосатова, Д.В. Изотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». − 2011. − Вып. 17, № 36 (253). – С. 48–50.

11. Иванов, М.А. К вопросу образования трещин в двухтонных чугунных изложницах при литье цинковых блоков / М.А. Иванов // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – Вып.11. – С. 46–50.

12. Пименов, Д.Ю. Определение оптимального варианта многопереходной обработки торцовым фрезерованием / Д.Ю. Пименов // Металлообработка. – 2006. – № 5–6. – С. 73–74.

13. Пименов, Д.Ю. Разработка модели эпюры напряжений на задней поверхности зуба фрезы / Д.Ю. Пименов // Технология машиностроения. – 2010. – № 1. – С. 48–52.

14. Пименов, Д.Ю. Расчет предельной величины износа инструмента при торцовом фрезеровании литых заготовок / Д.Ю. Пименов // Теория и технология металлургического производства. – 2012. – № 12. – С. 177–181.

15. http://uvz.ru

16. http://aitcom.ru/indukczionnyie-elektropech

17. http://www.foundryclub.ru/catalog/omega

18. http://www.remixsa.pl

19. Проектирование и реконструкция литейных цехов: учеб. пособие к выполнению диплом. проекта для специальности 110400 / Б.А. Кулаков, Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина и др. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 143 с.

УДК 621.74.045

КЕРАМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ НА АЛЮМОБОРФОСФАТНОМ КОНЦЕНТРАТЕ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Л.Г. Знаменский, А.С. Варламов, С.С. Верцюх

Разработана технология изготовления керамических корундовых форм на алюмоборфосфатном концентрате. Эта технология является альтернативой этилсиликату и силикатным системам формообразования. Она позволяет улучшить комплекс физико-механических свойств керамических форм в литье по выплавляемым моделям. В результате улучшается качество точных отливок из сплавов химически активных металлов.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, керамическая форма, этилсиликатное связующее, алюмоборфосфатный концентрат.

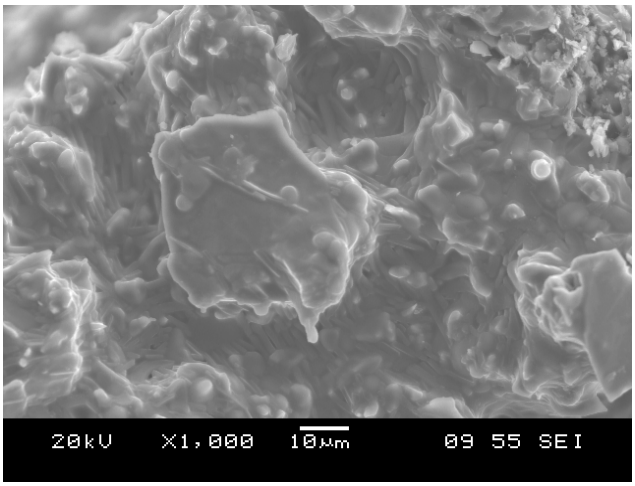
Увеличение ресурса и надежности авиационных газотурбинных двигателей в значительной степени определяется качеством литых лопаток. Для их изготовления из химически активных сплавов (жаропрочные никелевые и титановые сплавы) в настоящее время используется способ литья по выплавляемым моделям в корундовые керамические формы на этилсиликатном связующем.

Этилсиликат является одним из самых дорогостоящих и экологически опасных формовочных материалов в литейном производстве. Но, главное, после прокалки керамических форм это связующее – источник кремнезема, который в условиях вакуумной плавки и заливки жаропрочных сплавов разлагается на монооксид кремния и атомарный кислород, создающие в газовой фазе условия для образования поверхностных дефектов отливок.

Известны процессы подготовки бескремнеземного связующего «АЛЮМОКС», основанные на взаимодействии алюмоорганического соединения со спиртом и хелатирующим агентом [1]. Однако его приготовление имеет ресурсозатратный характер и характеризуется сложностью, многооперационностью, длительностью.

Поэтому, на кафедре металлургии и литейного производства Южно-Уральского государственного университета проводились комплексные теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку ресурсосберегающих процессов формообразования для точных отливок из жаропрочных сплавов. Получаемые керамические формы должны быть термохимически устойчивыми к заливаемым в условиях вакуума сплавам и обладать требуемыми физико-механическими свойствами.

При этом использовали суспензию на алюмоборфосфатном концентрате (АБФК) и электрокорунде, а обсыпку осуществляли зернистым периклазом, являющимся отвердителем к связующему. Как показали эксперименты, в этом случае обсыпка внедряется в слой суспензии и начинает взаимодействовать с алюмоборфосфатным концентратом с образованием объёмной каркасной структуры из центров отверждения. В результате сложных реакций между связующим и обсыпкой-отвердителем формируются системы из двузамещенных фосфатов магния, склонных к полимеризации и обуславливающих ускоренное формообразование. Наличие в суспензии фосфат-ионов уменьшает краевой угол смачивания водного раствора связующего и способствует качественному воспроизведению поверхности восковой модели [2]. Структура прокаленной оболочковой формы, а также химический состав, полученные на электронном растровом низковакуумном микроскопе JEOL JSM 6460LV, представлены на рис. 1.



Спектр	O	Mg	Al	P	Примеси	Итого
Спектр 1	52,02	3,53	28,77	14,06	1,62	100,00
Спектр 2	51,04	4,15	27,38	15,59	1,84	100,00
Спектр 3	44,63	14,17	28,59	10,41	2,2	100,00
Среднее	49,23	7,28	28,25	13,36	1,88	100,00

Рис. 1. Результаты растровой электронной микроскопии корундовой керамической формы на АБФК (×1000)

Разработанная технология обеспечивает ускорение цикла изготовления форм в 4…6 раз и повышение прочности формооболочек. Это создает условия для значительного улучшения качества и повышения экономической эффективности изготовления точных отливок. Кроме того, алюмоборфосфатный концентрат является недорогим, недефицитным, экологически чистым материалом.

В таблице приведены результаты испытаний технологии изготовления керамических оболочковых форм на АБФК в сравнении с базовой на гид-

ролизованном растворе этилсиликата-40 (условное содержание SiO_2 в связующем 14 %, наполнитель суспензии – электрокорунд).

На основе дериватографического (рис. 2) и рентгенофазового анализов установлены механизм формирования прочности керамических форм на АБФК-связующем и процессы, протекающие при нагреве и охлаждении указанных форм, в том числе при их армировании муллитосодержащей технологической добавкой. Твердение смеси происходит в результате выделения из раствора, роста и срастания кристаллогидратов различных форм фосфатов и полифосфатов [3]. При этом основная роль принадлежит кристаллогидратам $Mg(H_2PO_4)_2 \cdot 3H_2O$тв и $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$тв, которые образуются в результате химического взаимодействия суспензии на АБФК и обсыпки из зернистого периклаза. При нагреве форм в них проходят фазовые превращения, отвечающие за рост прочности, связанные с удалением кристаллизационной воды, при котором одно- и двузамещенные ортофосфаты магния становятся безводными и переходят в пирофосфаты и метафосфаты. Параллельно удалению влаги из металлофосфатов проходит дегидратация борной кислоты с образованием оксида бора, который способствует спеканию керамических форм при прокалке и наряду с армирующей фазой муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), равномерно распределенного в виде каркаса, обеспечивает высокую «горячую» прочность керамических форм. На этом этапе образуется также BPO_4, который после формирования отливки и при последующем охлаждении форм до 500 °С и ниже распадается на кристаллический B_2O_3 и газообразный P_2O_5, что и вызывает эффект разупрочнения керамических форм и улучшение условий удаления из них точных отливок.

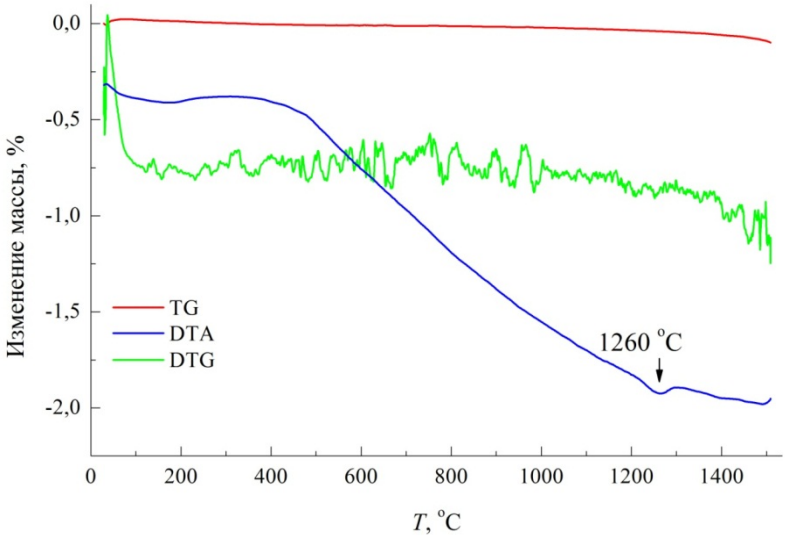


Рис. 2. Дериватограмма корундового керамического образца на АБФК

Описанные процессы обуславливают для керамических оболочковых форм на АБФК сочетание важнейших технологических свойств: высокой

«холодной» и «горячей» прочности с одной стороны, и разупрочнения после формирования отливки и последующего охлаждения с другой. Высокие прочностные характеристики форм на стадии формовки и заливки, в совокупности с разупрочнением смеси и последующей частичной деструкцией формы на стадии охлаждения и выбивки, обеспечивают получение отливок высокого качества, а также минимальную трудоемкость процессов выбивки форм и очистки отливок от остатков защемленной керамики.

Свойства суспензий и керамических форм

Наименование свойства	Базовая технология	Разработанная технология
Условная вязкость по ВЗ-4, с	65…75	55…65
Газопроницаемость керамической оболочки, ед.	2…4	11…16
Продолжительность изготовления оболочки, ч	24	4…6
Прочность образцов на изгиб, МПа	5,0…6,5	6,5…7,0
Прочность образцов на изгиб при 900 °С, МПа	5,5…7,0	8,0…9,5
Остаточная прочность образцов, МПа	3,5…4,5	1,5…1,8

Разработанная технология [4] позволяет изготавливать качественные оболочковые керамические формы на дешевом безопасном алюмоборфосфатном концентрате, причем, с физико-механическими свойствами, не уступающими этилсиликатным формам, а по выбиваемости, газопроницаемости, скорости формообразования существенно их превышающими. Поэтому, по сути, разработана эффективная альтернатива этилсиликатным формам, позволяющая при заданных физико-механических характеристиках обеспечить отсутствие взаимодействия керамических форм с химически активными сплавами и повысить качество отливок особо ответственного назначения.

Библиографический список

1. Повышение качества литых лопаток ГТД / В.С. Моисеев, М.С. Варфоломеев, А.С. Муркина, Г.И. Щербакова // Литейщик России. – 2012. – № 5. – С. 36–38.

2. Знаменский, Л.Г. Активация физическими полями литейных процессов: моногр. / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, В.В. Ерофеев. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2009. – 249 с.

3. Металлофосфатные связующие и смеси: моногр. / под общ. ред. И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Изд-во при Чуваш. ун-те, 1995. – 524 с.

4. Пат. 2478453 Российская Федерация, МПК В 22 С 1/00. Способ изготовления форм по выплавляемым моделям (варианты) / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, С.С. Верцюх. – № 2011146577/02; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

УДК: 669.046.464 + 669.3.054.82 + 669.017.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ШЛАКА СУЛЬФИДНОЙ ПЛАВКИ ПРОДУКТАМИ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДА

А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, И.С. Бородин, П.С. Салапонов

Обсуждаются результаты исследования фазовых превращений в шлаке сульфидной медной плавки.

Ключевые слова: фаялит, шлак сульфидной плавки, механизм восстановления.

К настоящему времени в отвалах накоплено огромное количество шлаков, образующихся при выплавке и конвертировании штейна, и это количество увеличивается ежегодно более, чем на 24 млн тонн. Складирование этих шлаков требует больших площадей, приводит к потере ценных металлов и вызывает проблемы в окружающей среде. Поэтому разработка способов использования таких шлаков является весьма актуальной задачей. Краткий обзор некоторых способов переработки и использования шлаков медных плавок приведен в работе [1].

Поскольку шлаки медных плавок содержат более 40 мас. % железа, большое внимание уделяют разработке способов извлечения этого элемента. В настоящей работе исследованы условия восстановления из шлака железа при температуре ниже температуры плавления железа, а также возможность выделения железа из продукта восстановления магнитной сепарацией.

В опытах использовали шлак Карабашского медеплавильного завода после его флотационного обезмеживания. Химический и фазовый составы шлака подробно описаны в работах [2, 3].

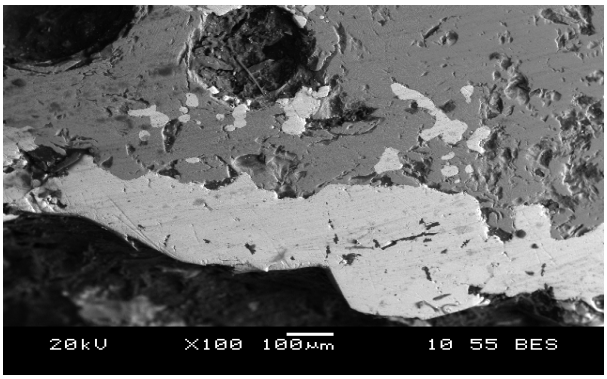
Основными элементами шлака являются железо (40,9 мас. %), кремний (11,9 мас. %) и кислород. Согласно результатам рентгенофазового анализа основная часть железа в шлаке связана с кремнеземом в фаялит, но некоторая его часть присутствует в виде свободных оксидов, преимущественно магнетита. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) показал, что кроме фаялита в шлаке присутствуют ещё три силикатные фазы – содержащая оксиды щелочных металлов («щелочная»), обогащенная оксидом кальция и состоящая, в основном, из алюмосиликатов железа.

Плавление исследованного шлака протекает в интервале температур 1215–1310 К [3]. Таким образом, восстановление шлака при температуре 1373 К должно протекать с участием жидкой фазы.

Восстановление шлака проводили в колоколообразном устройстве [4], представлявшем собой перевернутый корундовый тигель, верхнюю часть

которого заполняли порошком шлака, а остальную часть – углеродистым восстановителем. Для исключения контакта шлака с восстановителем и тиглем его защищали углеграфитовой тканью. Взаимодействие шлака с тканью при температуре опытов не наблюдалось. Шихту нагревали до нужной температуры в течение 2 часов, а затем выдерживали при этой температуре от 2 до 7 часов. По окончании опыта устройство извлекали из печи и охлаждали на воздухе. Образцы после завершения опыта представляли собой продукт с явными признаками оплавления. Они имели форму «полого ореха» или уплотненной массы с большими газовыми порами внутри. Остывшие после опытов образцы распиливали, их внутренние части шлифовали и полировали на алмазной пасте. Обработанные таким образом поверхности образцов анализировали методом МРСА.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что при восстановлении дольше четырех часов весь фаялит претерпевал превращение с образованием металлического железа, твердого раствора железа в кремнеземе и фазы, в которой часть железа в структуре фаялита замещена магнием и алюминием (эту фазу назвали «замещенный фаялит»). Элементный состав «щелочной» фазы при восстановлении практически не изменялся, за исключением существенного возрастания содержания железа от исходных ~1,6 до ~10 ат. %. Другие силикатные фазы и оксиды железа в восстановленных образцах не обнаружены. Наиболее существенные изменения происходили во внешних зонах образцов (см. рисунок).



Микрофотография шлака восстановленного при температуре 1373 К и времени выдержки 2 часа: светлая фаза – металлическое железо; серая фаза – восстановленный фаялит

Поверхность образцов покрылась слоем металлического железа, к которому примыкает зона восстановленного фаялита. В восстановленной зоне внутри образцов железо не обнаружено, т. е. в процессе восстановления железо доставлялось к поверхности, образуя на ней слой металла. По химическому и фазовому составу восстановленная зона соответствовала продукту углетермического восстановления шлака в смеси с 10 мас. % древесного угля при температуре 1320 К в течение 7 часов [3]. Восстановитель-

ный потенциал в такой системе выше, чем в газотермическом процессе, и система приходит в состояние, близкое к равновесному. В образцах с открытой внутренней полостью на её поверхности, а также внутри образца, металлическое железо присутствовало в виде достаточно крупных включений.

Сравнительный анализ продуктов восстановления, полученных в опытах с разными углеродсодержащими материалами, показал, что наиболее эффективным восстановителем является древесный уголь, а использование для восстановления беззольных углей и других материалов, очищенных от углеводородов, нецелесообразно.

Как было показано в работах [4] и [5], с энергетической точки зрения при высоких температурах в процессах восстановления с участием углерода определяющую роль играет водород. Он является своего рода катализатором процесса и существенно повышает восстановительный потенциал системы.

Например, уже при температуре 955 К даже небольшое количество водорода способствует полному восстановлению оксидов железа в атмосфере водяного газа. С этих позиций механизм восстановления шлака продуктами газификации угля должен включать следующие стадии [3]:

$(H_2)_{газ} \rightarrow (H_2)_{адс} \rightarrow 2H_{адс}$;

$2H_{адс} + (O)_{адс} \rightarrow (H_2O)_{адс} \rightarrow (H_2O)_{газ}$;

$(H_2O)_{адс} + CO \rightarrow CO_2 + (H_2)_{газ}$;

$(H_2O)_{газ} + CO \rightarrow CO_2 + (H_2)_{газ}$;

$CO_2 + C \rightarrow 2CO$;

$(H_2O)_{газ} + C \rightarrow CO + H_2$.

Согласно этой схеме восстановительный потенциал в системе создается водородом (углеводородами). Наиболее эффективно такой процесс реализуется в колоколообразных устройствах. В проточных системах концентрация водорода в зоне реакции гораздо ниже и процесс восстановления продуктами газификации угля менее эффективен [4].

Продукты восстановления измельчили до размеров менее 80 мкм. Из порошка сухой магнитной сепарацией в поле 120–130 мТл выделили магнитную фракцию, содержание металлического железа в которой росло по мере увеличения времени выдержки, достигая >50 мас. % при 7 часах выдержки. Степень извлечения железа в магнитную фракцию при этом составила ~80 %. В силикатной фазе (стекле) осталось 24–30 мас % железа. Это соответствует результатам МРСА, согласно которым немагнитная составляющая содержит 20–24 мас. % железа. При выдержке в течение 7 часов образуются более крупные включения, основная масса которых не проходит через сито 80 мкм.

Известно [6], что при окислении фаялита на воздухе он разлагается на SiO_2 и магнетит, который затем окисляется до Fe_2O_3. Окисление шлака на

воздухе при температурах 1073–1373 К подтвердило эти данные. В полученных продуктах окисления основная масса железа была связана в Fe_2O_3. Поскольку восстановление железа из этого соединения протекает гораздо легче, чем из фаялита, следовало бы ожидать повышения эффективности процесса восстановления шлака после его предварительного окисления. Однако, протекающий параллельно синтез фаялита и спекание шлака, замедляющее скорости массопереноса реагентов, приводят к замедлению процесса восстановления железа. Таким образом, предварительное окисление шлака не повышает эффективность процесса восстановления железа из него.

Экспериментально установлено, что в колоколообразных устройствах при температуре 1373 К основная масса железа отвального шлака сульфидной плавки медных концентратов может быть восстановлена до металла продуктами газификации углеродистых восстановителей, содержащих углеводороды.

При косвенном восстановлении шлака при температуре выше температуры его плавления металлическое железо концентрируется, в основном, на внешней поверхности продукта восстановления, образуя крупные включения, которые легко извлекаются магнитной сепарацией.

Наиболее целесообразно восстанавливать железо из неокисленного шлака при температуре 1373 К в течение 4–7 часов.

Библиографический список

1. Gorai, Bipra. Characteristics and utilization of copper slag – a review / Bipra Gorai, R.K. Jana // Premchand Resources and Recycling. – 2003. – P. 299–313.

2. Фазовые превращения при окислительном обжиге шлака сульфидной медной плавки / А.А. Лыкасов, А.Н. Матонин, И.Г. Вертий, А.А. Кимяшев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15 (274). – С. 97–99.

3. Лыкасов, А.А Фазовые превращения при восстановлении шлака сульфидной медной плавки продуктами газификации углеродистых восстановителей при температуре 1320 К / А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, И.С. Власова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия» – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 24–28.

4. Дигонский, С.В. Теоретические основы и технология восстановительной плавки металлов из неокускованного сырья / С.В. Дигонский. – СПб.: Наука, 2007. – 322 с.

5. Системный анализ процессов восстановления оксидов железа в атмосфере водяного газа в присутствии углерода / Г.П. Вяткин, Г.Г. Михайлов, Ю.С. Кузнецов, О.И. Качурина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия» – 2012. – Вып. 18, № 15 (274). – С. 53–59.

6. Лыкасов, А. А. Условия фазовых равновесий в системе Fe–Si–O в интервале температур 1100–1300 К / А.А. Лыкасов, А.А. Кимяшев // Бутлеровские сообщения. – 2010. – Т. 21, № 7. – С. 42–49.

УДК 621.791.92

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЩЕЙ ВАННЫ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ШИРОКОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКЕ

А.М. Осипов, Ю.В. Безганс

Проведен аналитический и экспериментальный анализ влияния режимов на формирование наплавленного и проплавление основного металла при ручной и механизированной наплавке открытой дугой проволокой сплошного сечения марки Бр.КМц3-1. Установлено, что при наплавке отдельными валиками образуются подвороты. Это связано с большим коэффициентом расплавления электрода по сравнению со стальными электродами. Для устранения подворотов при наплавке отдельными валиками применяется подогрев детали перед наплавкой от 200 °С и выше.

Ключевые слова: технология, наплавка, коэффициент расплавления, подогрев.

Для образования общей ванны жидкого металла при широкослойной наплавке открытой дугой проволокой Бр.КМц3-1 с поперечными колебаниями дуги необходимо, чтобы длина ванны жидкого металла поперечного валика была не меньше двойной ширины наплавленного слоя. Это условие выполняется с учетом известного выражения [1].

$$B = \frac{q_U}{4\pi\lambda(T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}, \qquad (1)$$

где B – ширина наплавляемого слоя; $T_{\text{н}}$ – температура подогрева основного металла.

Из формулы (1) следует, что ширина наплавленного слоя, с учетом двойной длины ванны, зависит от подогрева детали. При широкослойной наплавке с поперечными колебаниями дуги температура основного металла будет повышаться. Для определения температуры подогрева основного металла воспользуемся формулой [2], позволяющей определить приращение температуры основного металла при каждом колебании дуги.

$$T_{\text{н}} = \sum_n \frac{q_u}{v \cdot \delta \sqrt{4\pi\lambda c\rho \cdot t_{\text{н}}}} e^{-\frac{x^2}{4at_{\text{н}} - bt_{\text{н}}}}, \qquad (2)$$

где n – число пересечений дугой плоскости I–I (рис. 1); $t_{\text{н}}$ – время, прошедшее с момента пересечения дугой плоскости I–I при наплавке 1-го, 2-го и последующих поперечных валиков ($t_{\text{н}}$ уменьшается по мере увеличения n); b – коэффициент температуроотдачи.

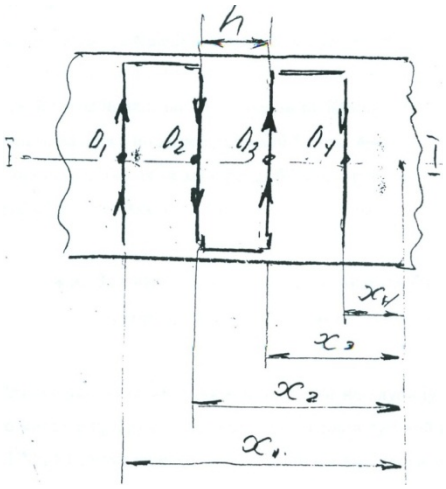


Рис. 1. Схема к расчету температуры подогрева пластины, ширина которой равна или близка к ширине наплавляемого слоя

Расчет температуры подогрева после наплавки поперечных валиков производился при следующих режимах: $q_n = 3800$ Вт ($I_д = 200$ А, $U_д = 25$ В); $\lambda = 0{,}38$ Вт/см·К; $a = 0{,}06$ см/с; $V_{нк} = 0{,}03$ см/с; $\delta = 1{,}2$ см; $b = 0{,}003$; $B = 4$ см. Ширина валика при ручной дуговой наплавке электродом Бр.КМц3-1, $d_э = 4$ мм, составляет 1,9 см (см.таблицу). С учетом перекрытия валиков 0,4 см величина $h = 1{,}5$ см (см. рис. 1).

Расчетом установлено, что при широкослойной наплавке с поперечными колебаниями электрода температура подогрева основного металла после наплавки трех валиков составил 120 °С, восьми – 140 °С.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений ширины валиков $в_в$ и ширины зоны проплавления основного металла $в_{пр}$

$I_д$, А	V, см/с	$U_д$, В	Расчет		Эксперимент		Подвороты
			$в_в$, см	$в_{пр}$, см	$в_в$, см	$в_{пр}$, см	
Ручная наплавка $d_э = 4$ мм							
70	0,3	25	0,8	0,30	1,0	0,6	Есть
150	0,3	25	1,1	0,46	1,3	0,9	Есть
200	0,3	25	1,3	0,64	1,9	1,5	Есть
Механизированная наплавка $d_э = 1{,}8$ мм							
70	0,3	25	0,8	0,30	0,76	0,28	Есть
150	0,3	25	1,1	0,46	1,1	0,65	Есть
200	0,3	25	1,3	0,64	1,8	1,05	Есть

Для проверки расчетных данных был проведен эксперимент. С обратной стороны пластины из стали Ст. 3 толщиной 1,2 см длиной 15 см и шириной 4 см были установлены две хромель-алюмелевые термопары на расстоянии 6,0 и 12,0 см от края пластины. Наплавка 3 и 8 валиков производилась ручным способом открытой дугой проволокой Бр.КМц3-1 диаметром 4,4 мм на обратной полярности при $I_д = 200$ А и скорости наплавки 0,3 см/с. Измерение температуры подогрева производилось гальванометром. Установлено, что температура подогрева основного металла после наплавки трех валиков составила 200 °С, восьми – 280 °С. При этом образование общей ванны не наблюдалось. При увеличении скорости наплавки с целью получения тонкого наплавленного слоя температура подогрева основного металла уменьшается. Расчетом по формуле (1) установлено, что

для образования ванны жидкого металла при наплавке пластины шириной 4 см температура подогрева основного металла при вышеприведенных режимах должна равняться 660 °С. Это больше экспериментальной. Следовательно, при широкослойной наплавке с поперечными колебаниями электрода при вышеприведенных условиях наплавка в общую ванну невозможна.

Для получения валиков без подворотов были проведены эксперименты при ручной дуговой наплавке электродом Бр.КМц3-1, $d_э = 4$ мм при $I_д = 200$ А одиночного валика с подогревом до 200 °С (рис. 2) и уширенного валика (с поперечными колебаниями электрода) без подогрева основного металла (рис. 3). В обоих случаях образование валиков происходит без подворотов.

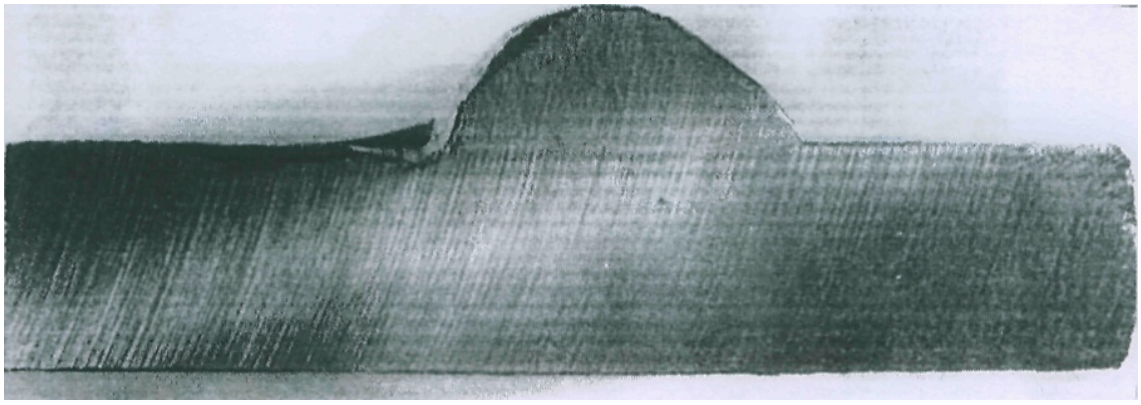


Рис. 2. Одиночный валик. Электрод Бр.КМц3-1, $d_э = 4$ мм, $I_д = 200$ А, температура подогрева 200 °С. Ручная дуговая наплавка

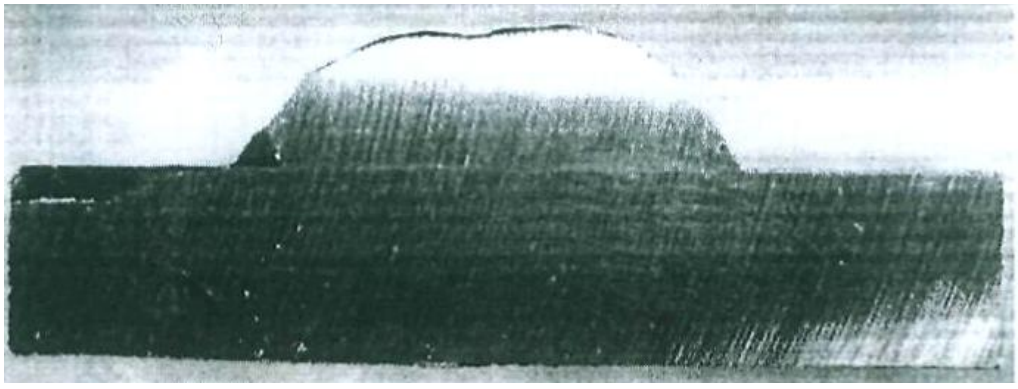


Рис. 3. Уширенный валик. Электрод Бр.КМц3-1, $d_э = 4$ мм, $I_д = 200$ А. Ручная дуговая наплавка (без подогрева)

Библиографический список

1. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Г.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

2. Теория сварочных процессов /под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 506 с.

УДК 669.15-198:669.27

ВЫПЛАВКА ФЕРРОВОЛЬФРАМА ВНЕПЕЧНЫМ СПОСОБОМ В ПЕРФОРИРОВАННОМ ГОРНЕ

И.Ю. Пашкеев, К.Ю. Пашкеев

В статье приведен анализ причин выбросов металла и шлака из типового горна в процессе плавки. Рассмотрена работа перфорированного горна дренажным отводом газов из реакционного слоя шихты. Представлены результаты сравнительного анализа работы типового и перфорированного горна.

Ключевые слова: алюминотермия, ферровольфрам, газообразование, перфорированный горн.

Наибольшее распространение среди внепечной металлотермии получили алюминотермические процессы.

Алюмотермия как способ выплавки металлов имеет множество преимуществ: возможность получения высоких температур процесса – 2000–2500 °С без подвода тепла извне; высокая восстановительная способность алюминия позволяет получать большинство металлов; возможность выплавки металла с более низким содержанием углерода, в сравнении с электротермическим способом.

К наиболее существенным недостаткам процессов внепечной металлотермии, отмечаемые в монографиях, относятся: невозможность управления процессами по ходу плавки, присутствие некоторого количества алюминия в получаемом сплаве, трудность организации непрерывного процесса.

Хотя алюминотермический процесс имеет перечисленные недостатки, этот метод до последнего времени остается преобладающим при выплавке тугоплавких металлов и сплавов, металлического хрома, ферротитана, феррованадия и ряда других ферросплавов и лигатур.

Взаимодействие оксидов металлов с алюминием может быть представлено в общем виде уравнением:

$$2/m\ Me_nO_m + 2/3m\ Al = 2n/m\ Me + 1/3m\ Al_2O_3. \quad (1)$$

Основное условие самопроизвольного протекания этой реакции – более высокая термодинамическая прочность оксида алюминия по сравнению с оксидами восстанавливаемых металлов. Элементы, имеющие при высоких температурах меньшее, чем алюминий, абсолютное значение энергии Гиббса ΔG^0, располагаются в следующем порядке: Mg, B, Ti, Si, Mn, Nb, Cr, V, Fe, W, Mo [1].

Возможность самопроизвольного процесса внепечного восстановления оксидов металлов алюминием определяется тепловым эффектом, теплоемкостью, теплопроводностью шихтовых материалов и продуктов плавки, теплообменом с окружающей средой и т. д. В промышленной алюминотермической плавке необходимо обеспечить не только самопроизвольное

распространение восстановительных реакций, но и полное разделение металлической и шлаковой фаз. Основное условие осуществления внепечной алюминотермической плавки запишется:

$$Q_{\text{экз.восст}} \geq Q_{\text{расплав.нагрев}} + Q_{\text{потери}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{экз.восст}}$ – тепловой эффект экзотермического восстановления, $Q_{\text{расплавнагрев}}$ – количество тепла, необходимое для расплавления продуктов реакции и их нагрева, $Q_{\text{потери}}$ – тепло для компенсации тепловых потерь.

Выплавку ферровольфрама осуществляют в металлическом, футерованном магнезитовым кирпичом плавильном горне, цилиндрической формы с зажиганием шихты сверху [1].

Вопросу образования газов и их удалению из горна в процессе алюминотермической плавки посвящен ряд работ [2–4].

Существующие производственные технологии и конструкции плавильных горнов не предусматривают отвод газов из зоны реакции, и это приводит к выбросу газов через расплав металла и шлака, что препятствует их разделению и протеканию нормального процесса горения.

На рис. 1 показаны микрорентгеноспектральный анализ металлического выплеска из горна типовой конструкции и проба металла, взятая из реакционного слоя при выплавке ферровольфрама. Элементный состав фаз выплеска представлен в табл. 1.

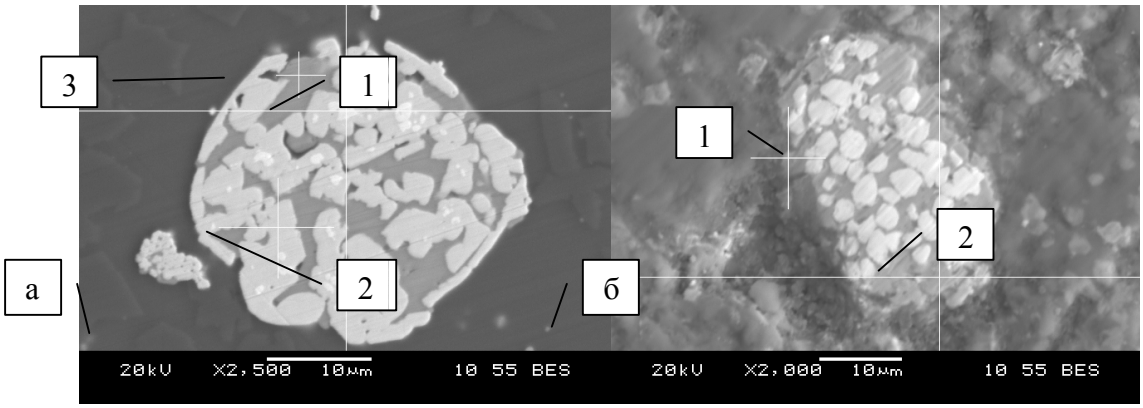


Рис. 1. Микрорентгеноспектральный анализ ферровольфрама:
а – проба металла из реакционного слоя, б – металлическое включение в шлаке

Таблица 1

Элементный состав фаз шлакометаллического выплеска, % мас.*

Спектр	O	Na	Si	Ca	Fe	W
а – Сп 1	–	–	–	–	4,10	95,90
а – Сп 2	–	–	–	–	29,22	70,78
а – Сп 3	–	–	–	–	79,69	20,31
б – Сп 1	2,78	0,87	–	1,37	–	94,97
б – Сп 2	1,71	0,48	0,25	0,71	89,89	6,97

* Состав металла в слитке: W – 71,51 %, Fe – 27,95 %, Al – 0,54 %.

Основным технологическим требованием ведения плавки является удаление газов из зоны реакции. На кафедре физической химии ЮУрГУ спроектирован и изготовлен перфорированный горн, предусматривающий отвод газов из зоны реакции через газопроницаемую футеровку и металлический корпус [5]. Рис. 2 поясняет принцип работы агрегата.

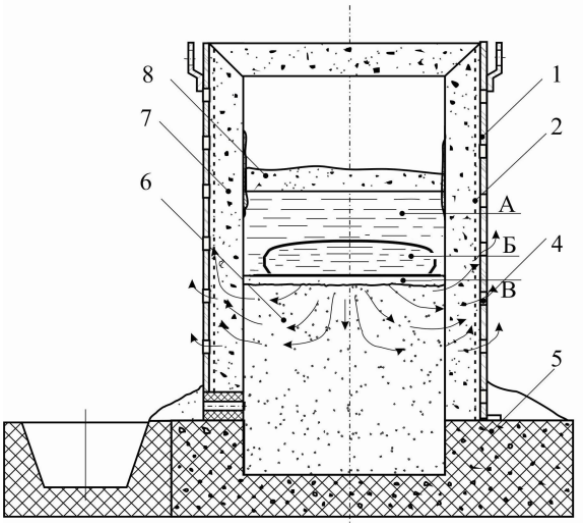


Рис. 2. Схема работы перфорированного горна. А – шлак, Б – металл, В – реакционный фронт горения, стрелками показан выход газов. 1– корпус горна, 2 – металлическая сетка, 4 – отверстия в корпусе, 5 – основание с углублением для слитка (копильник), 6 – шихта, 7, 8 – засыпная футеровка, 3 – непоказанный на рисунке тонкостенный цилиндр, применяемый для разделения засыпной футеровки и металлотермической шихты, удаляется после сборки горна

На рис. 3 показано изменение давления газов в реакционном слое.

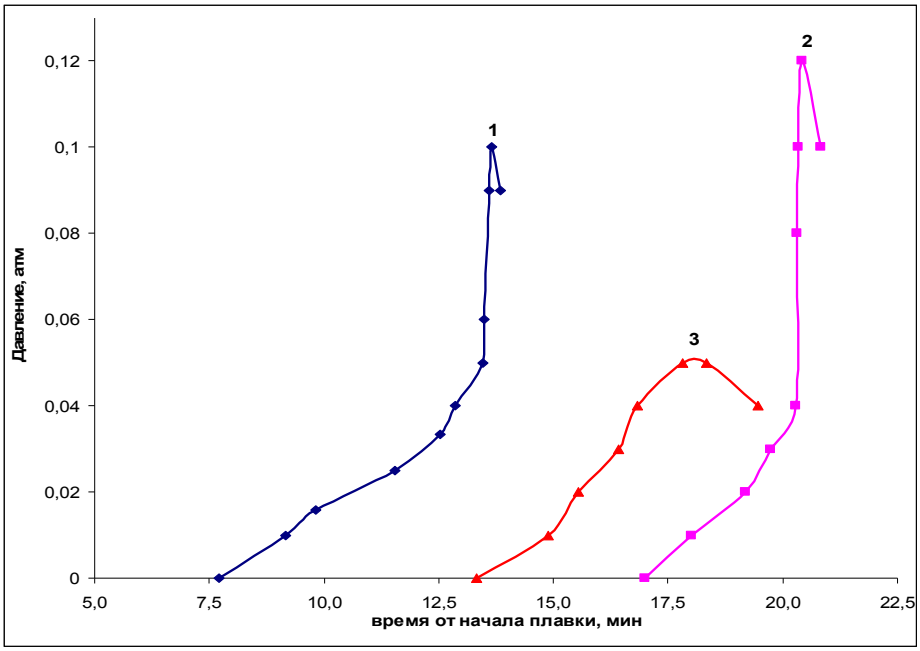


Рис. 3 Изменение избыточного давления в горне V = 0,285 м^3 при выплавке 240 кг ферровольфрама: 1, 2 – измерения на уровне 0,5 и 0,75 м в горне, футерованном кирпичом; 3 – измерения на уровне 0,75 м в перфорированном горне

В процессе плавки опускающийся слой металла и шлака сжимает газы в поровом пространстве горна под реакционным слоем шихты. Это приводит к выбросам газов через шлак и металл в горнах типовой конструкции.

В горне новой конструкции происходит дренажный отвод газов в процессе плавки из реакционного слоя и нагрев нижележащей шихты теплом отходящих газов. Плавка протекает в большом диапазоне линейных скоростей перемещения реакционной зоны без выброса газов через слой металла и шлака и потери WO_3 с отходящими газами.

Для сравнения в табл. 2 приводятся результаты плавок, выполненных в типовом и перфорированном горне аналогичных размеров пространства, с одинаковым составом, массой и термичностью шихты.

Таблица 2

Сравнение плавок в перфорированном горне и типовой конструкции

№	Параметр плавки	Футерованный горн	Перфорированный горн
1	Время горения шихты, мин	26	21
2	Линейная скорость перемещения реакционного слоя, мм/с	0,77	0,94
3	Скорость проплавления шихты, кг/(м^2·мин)	101	126
4	Содержание вольфрама в сплаве, %	71,6	73,4
5	Степень извлечения вольфрама, %	93,4	96,2
6	Температура расплава, °С	1679	1892
7	Температура слитка, °С	1959	2056

Следует отметить, что увеличение содержания вольфрама в сплаве является следствием только организации направления потока отходящих газов. Повышение температуры металла, обусловленное снижением потерь тепла через верх горна с отходящими газами и подогревом шихты в процессе плавления отходящими газами, в конечном счете, дает более плотный слиток с более чистой поверхностью.

Библиографический список

1. Плинер, Ю.Л. Алюминотермическое производство ферросплавов и лигатур / Ю.Л. Плинер, С.И. Сучильников, Е.А. Рубинштейн. – М.: Металлургиздат. – 1963. – 175 с.

2. Дубровин, А.С. Металлотермия специальных сплавов / А.С. Дубровин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 254 с.

3. Алюминотермическая выплавка ферровольфрама / А.С. Дубровин, Г.Ф. Игнатенко, Н.И. Субботин и др. // Производство ферросплавов. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1972. – Вып. 1. – С. 46–54.

4. Дубровин, А.С. Снижение газовыделения в металлотермических процессах / А.С. Дубровин, В.Л. Кузнецов. // Металлотермия: сб. науч. тр. – Челябинск: Челяб. отд-ние изд-ва «Металлургия», 1996. – № 17. – С. 41–44.

5. Пат. 2465361 Российская Федерация, МПК C22C33/04, C21B15/02. Алюминотермический способ получения металлов и плавильный горн для его осуществления / И.Ю. Пашкеев, К.Ю. Пашкеев, Ю.И. Пашкеев, К.С. Калинин, Е.Н. Карпенко, А.В. Антипин; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – № 2011137901/02; заявл. 14.09.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30. – 6 с.

УДК 669.094

КИНЕТИКА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАСПАДЕ ВЮСТИТА, ПОЛУЧЕННОГО ОКИСЛЕНИЕМ ЖЕЛЕЗА

Ю.Н. Тепляков

Целью предлагаемой работы является изучение механизма и кинетики распада вюстита, входящего в состав железной окалины и кинетики образования новых фаз с использованием методов высокотемпературного РФА. Установлены схема распада, контролирующие факторы, а также определены константы скорости и энергии активации процесса.

Ключевые слова: вюстит, кинетика, распад, диффузия.

Фазовый состав окалины, образующейся на железе в кислородосодержащих средах, определяется температурой и парциальным давлением кислорода. Окончательное формирование состава завершается при охлаждении металла до комнатной температуры, и, в основном, за счет распада вюстита, если окисление происходило при температуре выше точки Шадрона (570 °С).

Вопрос о свойствах вюстита и его распаде изучался широко, например, [1–3] и является достаточно важным, поскольку вюстит – основной компонент высокотемпературной окалины на железе и сталях и, по существу, определяет её физические и химические свойства. Так в работе [4] показано, что присутствие продуктов распада вюстита существенным образом определяет коррозионную стойкость оксидных покрытий на сталях, а также травимость окалины в кислотах. С целью выяснения основных закономерностей и кинетики распада вюстита были проведены исследования окалины с применением высокотемпературного РФА .

Методика проведённых исследований подробно изложена в работе [5].

Рентгено-структурные и рентгено-фазовые измерения проводились по общепринятым методикам [5, 6]. Средний состав исследованного исходного вюстита можно выразить $Fe_{0,96}O$, что соответствует параметру кристаллической решетки $a = 4{,}307 \cdot 10^{-10}$ м.

Проведенные измерения показали, что распад вюстита, входящего в состав окалины, протекает по двум механизмам, в зависимости от температуры отпуска. Так, при температуре выше 400 °С, распад протекает с одновременным выделением магнетита и железа по реакции

$$4\,Fe_{1-x}O \rightarrow Fe_3O_4 + (1 - 4x)\,Fe.$$

При температуре ниже 400 °С распад вюстита происходит в две стадии. На первой образуется первичный магнетит и некоторая промежуточная метастабильная фаза. Как показали измерения – это вюстит с параметром кристаллической решетки $a = 4{,}326 \cdot 10^{-10}$ м.

В работах [8, 9] установлено, что такой вюстит является стехиометрическим или очень близким к нему по составу. Стадию образования стехиометрического вюстита или стадию предэвтектоидного распада можно выразить уравнением в общем виде

$(1 - 4y)\,Fe_{1-x}O \rightarrow (1 - 4x)\,Fe_{1-y}O + (x - y)\,Fe_3O_4, \quad x > y.$

После полного распада исходного вюстита $Fe_{1-x}O$ наступает вторая стадия, стадия распада стехиометрического вюстита с образованием вторичного магнетита и дисперсного железа по реакции

$4\,Fe_{1-y}O \rightarrow Fe_3O_4 + (1 - 4y)\,Fe.$

Полученные данные о механизме распада вюстита, входящего с состав железной окалины подтверждают результаты, изложенные в работе [10].

На рис. 1 приведены результаты исследований состава окалины при изотермическом отпуске для температурного интервала 300–550 °С. Полученные зависимости показывают, что скорость распада определяется температурой отпуска и максимум скорости распада лежит в интервале температур 350–400 °С. При температурах отпуска ниже 400 °С возможно одновременное существование в окалине двух вюститов – исходного и промежуточной метастабильной фазы – стехиометрического вюстита. Полученные зависимости позволяют определить температурно-временные интервалы существования фаз, исчезающих и возникающих при диспропорционировании вюстита. В практическом плане, важное значение имеет интервал существования стехиометрического вюстита, поскольку его присутствие увеличивает коррозионную стойкость оксидных покрытий на железе и углеродистых сталях. Это, в свою очередь, позволяет скорректировать технологию оксидирования.

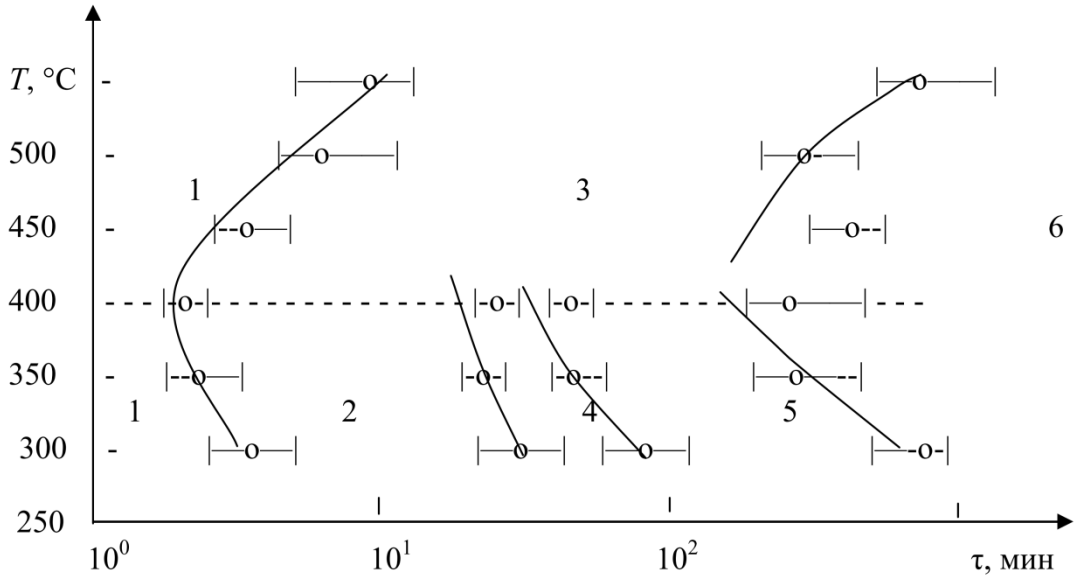


Рис. 1. Изотермический распад вюстита:
1 – $Fe_{1-x}O$; 2 – $Fe_{1-x}O$, Fe_3O_4, FeO; 3 – $Fe_{1-x}O$, Fe_3O_4;
4 – FeO, Fe_3O_4; 5 – FeO, Fe_3O_4, Fe; 6 – Fe_3O_4; Fe

Причиной распада вюстита является его термодинамическая нестабильность при температурах ниже температуры Шадрона. Необходимым условием этого процесса является зарождение и рост продуктов распада, образующихся в объёме нестабильной фазы в результате топохимических процессов.Эти процессы представляют собой две последовательных реакции, влияющие друг на друга.

Изучение кинетики распада вюстита осложняется невозможностью непосредственного определения концентраций реагирующих веществ, так в работе [10] для этой цели использовалась интенсивность мессбауэровского спектра, а в работе [11] использовалась намагниченность образца. В данной работе в качестве кинетического показателя использовалась относительная интенсивность дифракционного максимума, пропорциональная концентрации [12]. Для измерений были выбраны максимумы соответствующие линиям {220} и {200}. Результаты измерений усреднялись по трём образцам.

На рис.2 представлены кинетические зависимости распада исходного нестехиометрического вюстита для температурных интервалов 550–450 °С и 400–300 °С, соответственно.

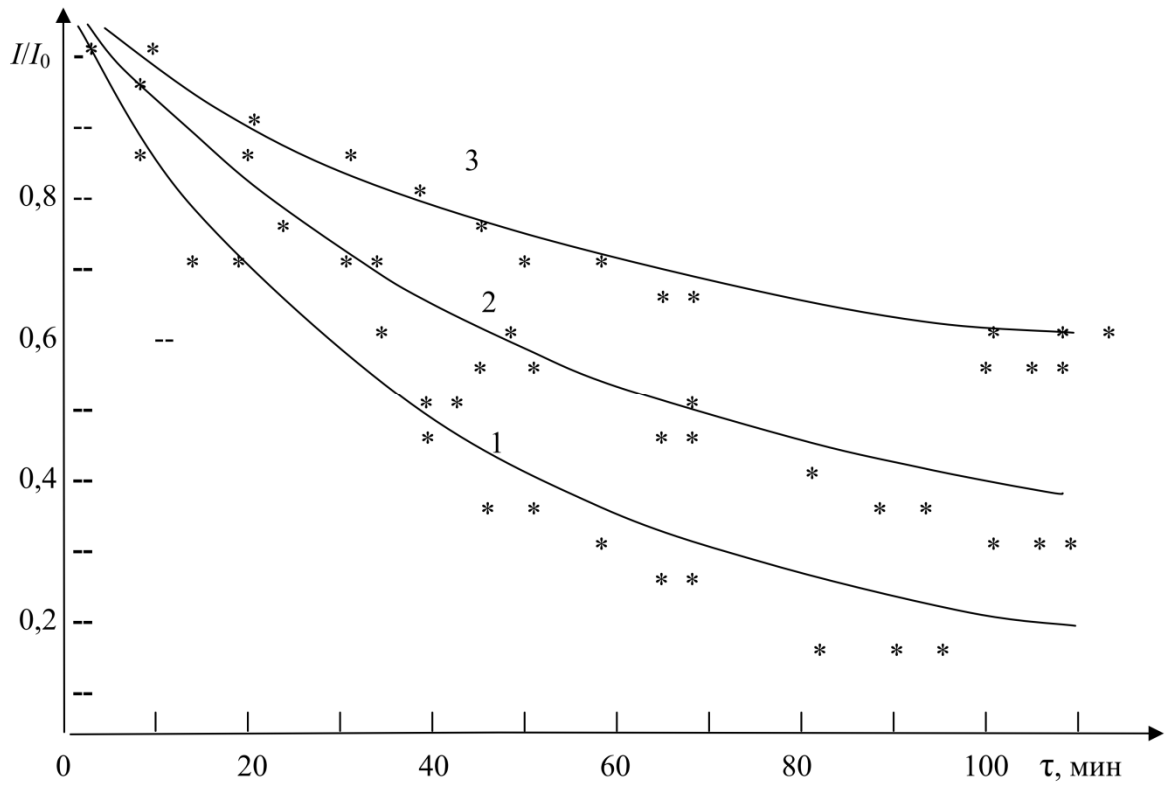


Рис. 2. Кинетические зависимости распада вюстита.
Температура отпуска: 1 – 450 °С; 2 – 500 °С; 3 – 550 °С

Константа скорости реакции рассчитывалась по периоду полураспада, значение которого определялось графически. Реакция описывается доста-

точно точно приведенным уравнением, однако, на начальном участке, при низких температурах отпуска, наблюдается некоторое отклонение. Это можно объяснить формированием количества вещества, достаточного для РФА.

На всех кинетических зависимостях существует выраженный индукционный период, длительность которого свидетельствует о скорости образования зародышей новых фаз.

Библиографический список

1. Ilschner, B. Ausscheidungshinetik in Wustit $Fe_{1-x}O$ / B. Ilschner, E. Mlitske // Act. Metallurg. – 1965. – Vol. 13, no. 7. – P.885–867.

2. Chandron, G. Sur les premires recherches relatives a l′instabilite du protoxyde fer / G. Chandron // Ann. Chim. – 1970. – T. 5. – P. 234–239.

3. Лыкасов, А.А. Физико-химические свойства вюстита и его растворов / А.А. Лыкасов, К. Карел, А.Н. Мень и др. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 227 с.

4. Распад вюстита и влияние его на коррозионную стойкость оксидированных сталей / Ю.Н. Тепляков и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 11. – С. 154–155.

5. Тепляков, Ю.Н. Распад вюстита, входящего в состав окалины / Ю.Н. Тепляков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2009. – Вып. 2, № 23 (156). − С. 36−42.

6. Руководство по рентгенографическому исследованию материалов / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1975. – 399 с.

7. Benord, I. Decomposition du proboxyde de fet au cours de traitements revenu structure a haute temperature / I. Benord, T. Herot, I. Manenc // Ann. Chim. – 1970. – T. 6. –P. 240–245.

8. Katsura, T. Yigh Pressure Synthesis of the Steciometric Compond FeO / T. Katsura, B. Iwasak, S. Kimura // J. Cyem. Phys. – 1976. – 286 p.

9. Hoffman, A. Der Zerfallsmechanismus des Wustite $Fe_{1-x}O$ unterhalb 570 °C / A. Hoffman // Z. Eitktrocyim. – 1959. – Bd. 63, Nr. 2. – P. 207–213.

10. Broussard, L. The Disproportion of Wustite / L. Broussard // J. Chem. Phys. – 1969. – Vol. 73, no. 6. –P. 1848–1854.

11. Шабалина, О.К. К вопросу о максимуме скорости распада вюстита / О.К. Шабалина, Г.И. Чуфаров // ДАН СССР. – 1962. – Т. 142, № 2.

12. Вагнер, В. Диффузия в оксидных полупроводниках / В. Вагнер // Атомная диффузия в полупроводниках. – М.: Мир, 1975. – С. 613–675.

УДК 669.-154

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Н.А. Шабурова

Проведен анализ используемых в промышленности способов внешнего воздействия на расплавы металлов, обеспечивающие повышение качества литого металла, стабильность его свойств и однородность структуры. Особое внимание уделено процессу модифицирования расплава. Анализировалась структура модификатора БСК-2 и структура низкоуглеродистой стали, модифицированной им.

Ключевые слова: расплавы металлов; внешние воздействия на расплавы; модифицирование.

Для получения качественного литейного сплава заданного химического состава с требуемым уровнем свойств необходимо правильно выбрать плавильный агрегат, который обеспечил бы оптимальный режим плавки при достаточной производительности. Так же следует предупреждать возможные загрязнения сплавов продуктами взаимодействия с атмосферой, материалами футеровки печи, флюсами.

Но на современном уровне развития производства и этого уже недостаточно. На сегодняшний день существует большое количество способов внешнего воздействия на расплавы, с помощью которых можно управлять литой структурой.

Химический метод объединяет совокупность методов управления, связанных с изменением состава сплава, т. е. дополнительным вводом компонентов (легирование и модифицирование), либо удалением вредных примесей.

Физические методы включают воздействия, осуществляемые за счет энергетического взаимодействия системы (сплавов) с окружающей средой без изменения химического состава сплава.

В особую вспомогательную группу отнесены защитные методы, которые непосредственно не влияют на литую структуру, а лишь способствуют стабилизации качества путем сохранения результатов воздействия.

Широко применяемые в практике физические методы воздействия в зависимости от вида энергоносителя можно разделить на следующие группы: тепловые; барометрические; гравитационные; механические; электромагнитные; высокоэнергетические (корпускулярные).

Различные механические методы включают взаимодействие путем механического перемещения одних микрообъемов материала относительно

других (перемешивание, фильтрация, продувка газами, обработка ультразвуком и вибрацией).

В гравитационных методах воздействуют на структуру за счет изменения силы тяжести (от невесомости до высокоскоростного центрифугирования, включая центробежное литье).

Тепловые методы включают термовременную и термоскоростную обработку расплава, а также управление литой структурой путем изменения скорости затвердевания и градиента температуры.

Барометрические методы заключаются в создании внешнего давления, отличного от атмосферного (от глубокого вакуума до кристаллизации под сверхвысоким давлением – взрывом).

Электромагнитные методы заключаются в обработке расплава либо затвердевающей отливки электрическим током и электромагнитными полями.

Методы корпускулярной обработки, например, лазером, плазмой или микрочастицами с высокой энергией. За счет воздействия на более глубокие уровни структуры сплавов они позволяют получать принципиально новые свойства.

Реализация обработки расплава с изменением его химического состава может осуществляться совместно с энергетическими взаимодействиями.

Все перечисленные способы воздействия на расплавы в настоящее время достаточно изучены, но, несмотря на это поиск новых и усовершенствование существующих методов эффективного воздействия на расплав непрерывно продолжается.

В России в последние 10–15 лет произошел прорыв по совершенствованию техники и технологии ввода модификаторов и микролегирующих элементов в металлический расплав. При этом вместо использования методов присадки реагентов кусками в ковш или инжекционной металлургии перешли на способ введения легкоокисляющихся реагентов в виде порошковой проволоки, что значительно снижает потери легкоокисляющихся элементов из-за окисления кислородом воздуха, шлаковой фазы.

Под модифицированием макроструктуры понимают получение отливок и слитков с мелкозернистым строением. Модифицирование направлено на решение ряда задач: измельчение макрозерна; измельчение микрозерна (дендритных ячеек); измельчение фазовых составляющих эвтектик, перитектик, в т. ч. хрупких и легкоплавких фаз (с изменением их состава путем введения присадок, образующих с этими фазами химические соединения); измельчение первичных кристаллов, выпадающих при кристаллизации, в до- или заэвтектических сплавах; измельчение формы и изменение размера и распределения неметаллических включений (интерметаллидов, карбидов, графита, оксидов, сульфидов, оксисульфидов, нитридов, фосфидов).

Одновременное решение всех этих задач зачастую оказывается невозможным. Так, измельчение макроструктуры часто сопровождается огруб-

лением микрозерен. Вместе с тем, иногда удается одновременно добиваться достижения нескольких из перечисленных целей.

Конечной задачей модифицирования является повышение механических, технологических и эксплуатационных свойств отливок, слитков, а также получаемых из них изделий и полуфабрикатов посредством измельчения литой структуры.

Поскольку размер литого зерна зависит от соотношения скоростей зарождения и роста кристаллов, то и модифицирование по существу направлено на изменение этих параметров в нужном направлении. Увеличение скоростей зарождения и роста кристаллов возможно при уменьшении энергии активации и величины поверхностного натяжения.

Более наглядно роль поверхностного натяжения на границе расплав – кристалл видна из выражений для полной работы образования зародышей ($A_{\text{р}}$) и критического радиуса зародыша ($r_{\text{кр}}$):

$$A_p = \frac{B \cdot \sigma^3}{T \cdot \Delta T^2}; \quad (1)$$

$$r_{\text{кр}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot T}{L \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

где L – теплота плавления, Дж/моль; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления, К; ΔT – переохлаждение, К; σ – поверхностное натяжение на границе кристалл – жидкая фаза.

Из (1) и (2) видно, что чем ниже поверхностное натяжение, тем меньше работа образования зародышей и ниже размер критического устойчивого зародыша. Тем самым снижение поверхностной энергии на границе расплав – кристалл облегчает зарождение центров кристаллизации, так как увеличивается скорость их зарождения. Аналогично будет действовать повышение переохлаждения.

Процесс зарождения кристаллов будет лимитирующим, при рассмотрении модифицирования обычно наибольшее внимание уделяют увеличению скорости зарождения центров кристаллизации под действием примесей-модификаторов.

Модификаторы по их действию можно классифицировать на три группы [1]:

1) модификаторы, повышающие смачиваемость одной составляющей сплава другой, т. е. снижающие поверхностное натяжение на границе между ними и тем самым облегчающие образование твердой фазы, контактирующей с жидкой;

2) модификаторы, являющиеся непосредственными зародышами кристаллизации;

3) инокуляторы – модификаторы, изменяющие литую структуру за счет уменьшения перегрева кристаллизующегося металлического расплава.

При выборе модифицирующих добавок мы остановились на барий-содержащий. И тому есть основания.

Если обратиться к существующим механизмам воздействия модификаторов, то можно отметить три из них:

1. Увеличение в расплаве неметаллических включений (которые могут служить центрами кристаллизации. Если эти включения находятся в физическом, химическом и структурном соответствии с основным металлом, то они оказывают инокулирующее действие).

2. Адсорбция элемента-модификатора на поверхности раздела фаз кристалл – расплав (вследствие чего происходит замедление скорости роста кристалла).

3. Связан с низкой предельной растворимостью модификатора в железе (при этом, чем меньше растворимость элемента, тем при меньшей его концентрации проявляется модифицирующий эффект).

Эффективность бария высока с точки двух из указанных механизмов. Он, во-первых, из всех ЩЗМ металлов имеет наименьшую растворимость в железе, а во-вторых, обладает сильным воздействием на электронное состояние жидкой стали [2].

В работе исследовалась структура модификатора БСК-2 и низкоуглеродистой стали 20 после модифицирования БСК-2.

По результатам исследования можно отметить:

1. Модификатор изначально имеет грубое дендритное строение, следовательно, для достижения наилучшего модифицирующего эффекта целесообразно его максимальное измельчение.

2. Сравнительный анализ образцов металла, отобранных через разные промежутки времени после ввода модификатора, свидетельствует об уменьшении количества и размеров неметаллических включений при увеличении продолжительности выдержки после модифицирования.

3. Включения с барием обнаруживаются во всех исследуемых образцах, включений, содержащих стронций, не обнаружено.

Библиографический список

1. Гольдштейн, Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.

2. Рябчиков, И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. – М.: Экомет, 2008. – 400 с.

УДК 669.046:544.34

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ Fe–Ge–O ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 1050–1300 К

С.В. Штин, А.А. Лыкасов

Фазовые равновесия в системе Fe–Ge–O исследованы методом измерения ЭДС гальванических элементов. По результатам работы рассчитаны равновесные давления кислорода, построены изотермические сечения диаграммы состояния системы при 1173 и 1273 К.

Ключевые слова: железо, германий, вюстит, шпинель, фазовая диаграмма.

Для исследования фазовых равновесий в системе Fe–Ge–O был использован метод измерения ЭДС концентрационного по кислороду гальванического элемента с твердым кислородпроводящим электролитом [1]. Схема гальванического элемента имеет вид:

$$\mathrm{Pt}\left|\mathrm{Fe,FeO}_y\right|\mathrm{ZrO_2{+}Y_2O_3}\left|\mathrm{Fe}_{1-c}\mathrm{Ge}_c\mathrm{O}_y\right|\mathrm{Pt}$$

Образцы для исследования были приготовлены методом твердофазной реакции. Химическая формула, описывающая валовый состав любой композиции, – $\mathrm{Fe}_{1-c}\mathrm{Ge}_c\mathrm{O}_y$, где c – отношение числа молей германия к общему числу молей германия и железа, y – степень окисленности – отношение числа молей кислорода к общему числу молей германия и железа.

Измерения ЭДС проводили в атмосфере гелия при температурах 1050–1300 К. В работе была использована ячейка с разделенным газовым пространством [2]. Такая конструкция исключает изменение состава образца во время опыта, вызванное высокой упругостью пара монооксида германия.

По результатам измерения ЭДС были рассчитаны давления кислорода, равновесные исследованным веществам и построены изотермические сечения диаграммы «$\lg P_{\mathrm{O_2}}$ – состав – температура» системы железо – германий – кислород при температурах 1273 К (рис. 1) и 1173 К. Сечения представлены в виде двух графиков: верхний – фазовая диаграмма в координатах $y – c$, нижний – зависимость $\lg P_{\mathrm{O_2}}$ от содержания германия вдоль границы каждой фазы.

При исследовании равновесия вюститного раствора с металлическими фазами образцы были аттестованы электронно-зондовым микроанализом и рентгенографическим анализом. Установлено, что они представляют собой гетерогенные смеси вюститного раствора и металлических фаз.

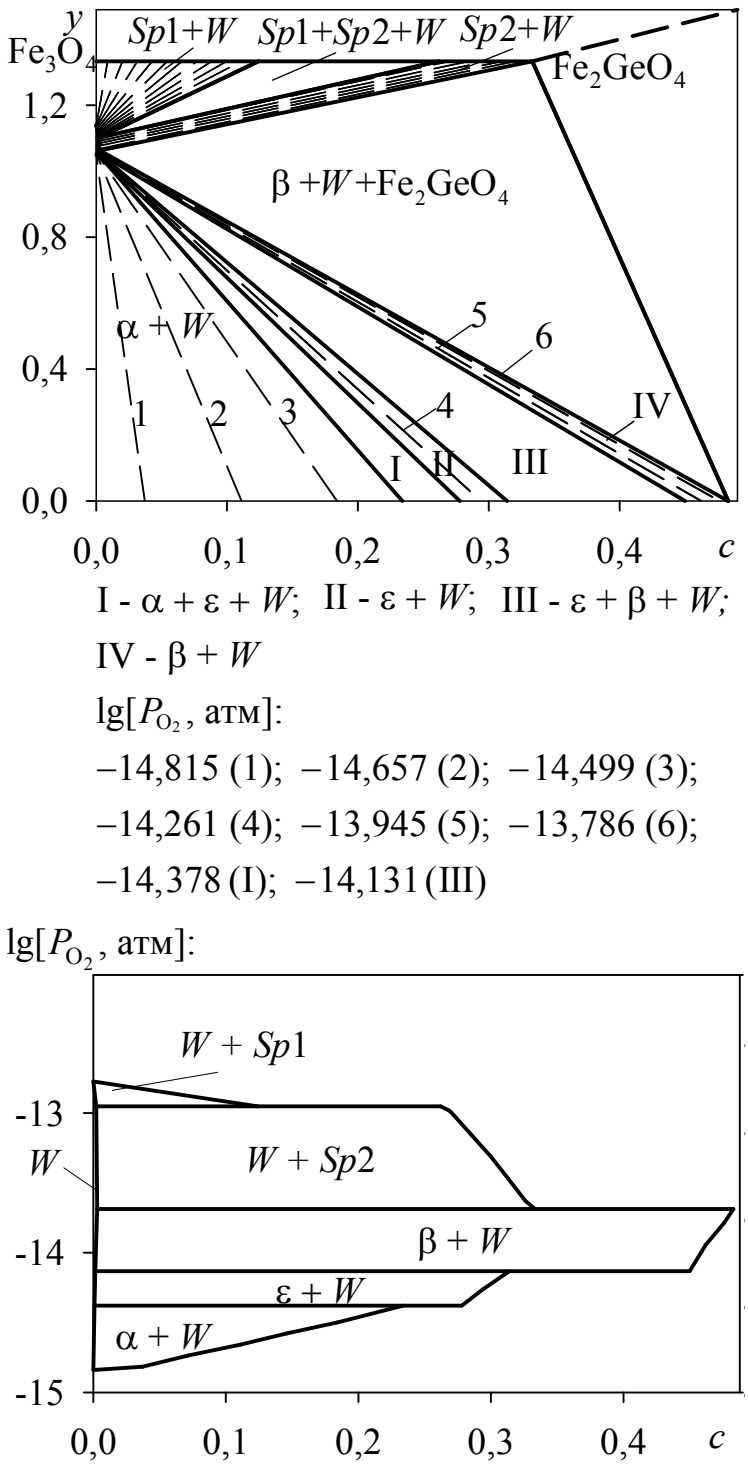


Рис. 1. Изотермическое сечение диаграммы состояния системы Fe–Ge–O при температуре 1273 К

Обработкой результатов измерения ЭДС гальванического элемента с использованием данных рентгенографического и электронно-зондового микроанализа определены координаты границ двухфазных и трехфазных областей равновесия вюститного раствора и металлических фаз (рис. 2).

Эти данные и результаты исследований условий равновесия вюститного раствора с сопряженными фазами позволили определить растворимость германия в вюстите различной степени окисленности.

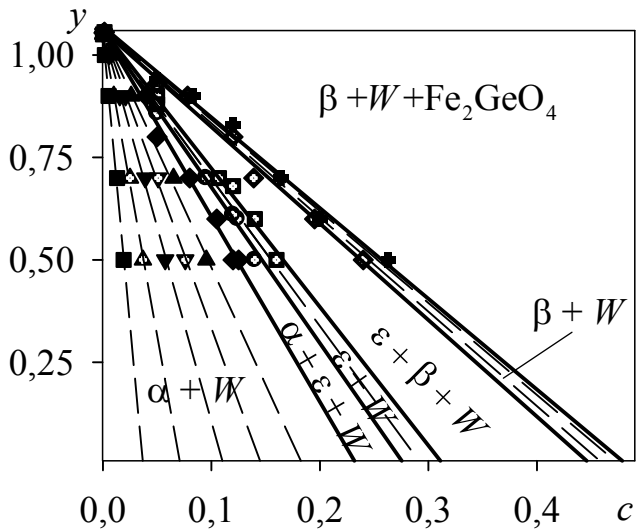


Рис. 2. Границы и коноды в областях равновесия вюститной и металлических фаз при температуре 1273 К

Состав вюститной фазы, находящейся в равновесии с металлическими фазами, был определен по пересечению изобар кислорода вюститной области с соответствующими им конодами областей равновесия вюститной и металлических фаз. Координаты границы вюститной области при 1273 К показаны на рис. 3.

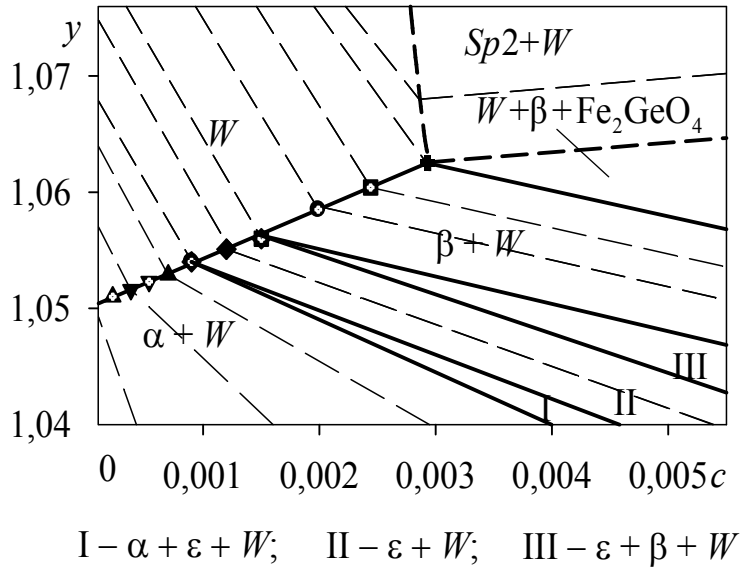


Рис. 3. Низкокислородная граница вюститной области при температуре 1273 К

При исследовании фазовых равновесий в области существования шпинельного и вюститного растворов было установлено, что Fe_3O_4 и Fe_2GeO_4 образуют две шпинельные фазы: одна на основе Fe_3O_4 (*Sp*1), другая – на основе Fe_2GeO_4 (*Sp*2). Таким образом, в данной области составов реализуются следующие равновесия: вюстит (*W*) + шпинель на основе Fe_3O_4 (*Sp*1), вюстит (*W*) + шпинель на основе Fe_2GeO_4 (*Sp*2), а также область трехфазного равновесия вюстит (W + *Sp*1 + *Sp*2). Определены координаты высококислородной границы области гомогенности германийзамещенного вюстита, установлено, что при температуре 1273 К предельная растворимость германия отвечает катионной доле германия в вюститном растворе $c = 0{,}0029$, степень окисленности такого раствора $y = 1{,}064$. С уменьшением температуры растворимость германия в вюстите понижается: при 1173 К $c = 0{,}0024$. Определены границы фазовых областей двух- и трехфазнного равновесий и построен фрагмент фазовой диаграммы в этих областях (рис. 4).

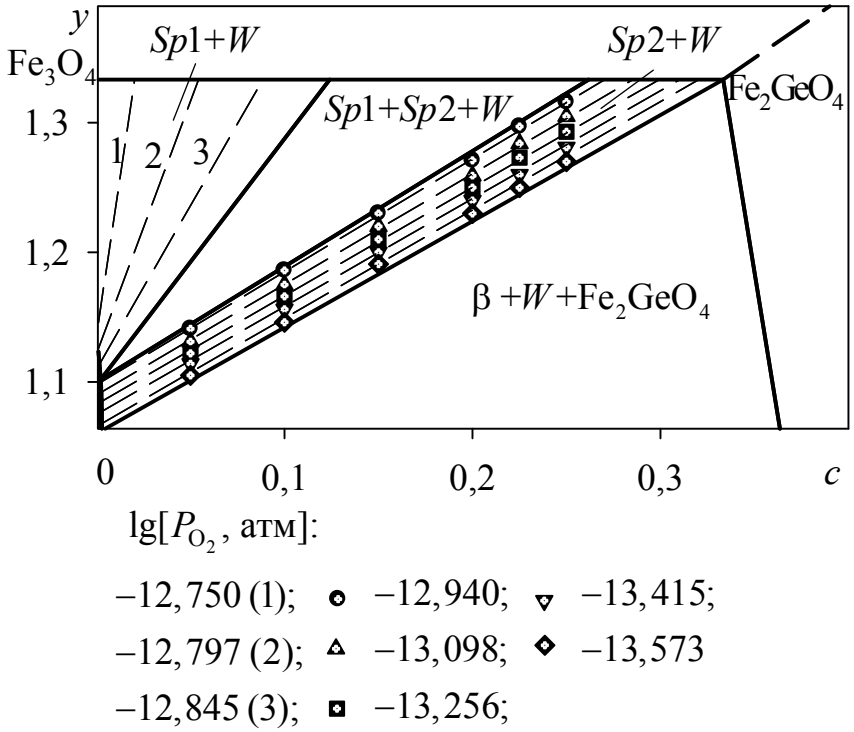


Рис. 4. Фрагмент фазовой диаграммы в области равновесия шпинельных растворов при температуре 1273 К

Библиографический список

1. Физико-химические свойства вюстита и его растворов / А.А. Лыкасов, К. Карел, А.Н. Мень и др. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1987. – 230 с.

2. Штин, С.В. Фазовые равновесия в системе $Fe – Fe_3O_4 – Fe_2GeO_4 – Ge$ / С.В. Штин, А.А. Лыкасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2007. – Вып. 9, № 19 (91). – С. 118–121.

УДК 621.791.05

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАМЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

С.И. Ярославцев, М.А. Иванов, Ю.В. Безганс

По результатам проведенных исследований нагружения типового сварного шва в рамной конструкции деталей рельсового транспорта получено поле напряжений и установлены максимальные растягивающие напряжений. Установлены места возможного образования сварочных дефектов, в том числе трещин.

Ключевые слова: напряжения, сварка, сварное соединение, металлоконструкция, рама, трещина, дефект.

При изготовлении деталей рельсового транспорта используются профильные трубы, а так же сваренные из листов протяженные балки. Они являются основой силового каркаса всей конструкции.

Концепция разработки сталей и сварных соединений [4, 5] для деталей рельсового транспорта предусматривает снижение содержание углерода; повышение чистоты металла по вредным примесям; рациональное микролегирование; термомеханическую прокатку; рациональный тепловой режим [6, 7, 15]; использование принципов ресурсосбережения [12–14]; снижение дефектности сварных швов [1]; отсутствие трещин [8]; повышение стойкости сварных деталей против лавинных разрушений [2]; снижение остаточных сварочных напряжений [3]; качественную механическую обработку [9–11].

Проанализируем напряжения в наименее защищенных от разрушения её элементах – сварных швах. Рассмотрим вариант рамы из труб прямоугольного (профильного) сечения рис. 1. Вспомогательная планка ступенчатого сплошного сечения (на рис.1 показана стрелкой) служит площадкой для приложения нагрузки – изгибающей, растягивающей и др.

Приложен изгибающий момент – пара сил. Показана половина узла – разрез по горизонтальной плоскости симметрии. Максимальные напряжения обнаруживаются в сварных швах величиной около 500 МПа (рис. 2).

Из анализа результатов расчета следует, что наиболее нагруженным элементом является сварной угловой шов. Для снижения уровня напряжений необходимо провести анализ аналогичного соединения, состоящего из труб круглого сечения, подобранных по диаметру так, чтобы момент инерции сечения оставался неизменным.

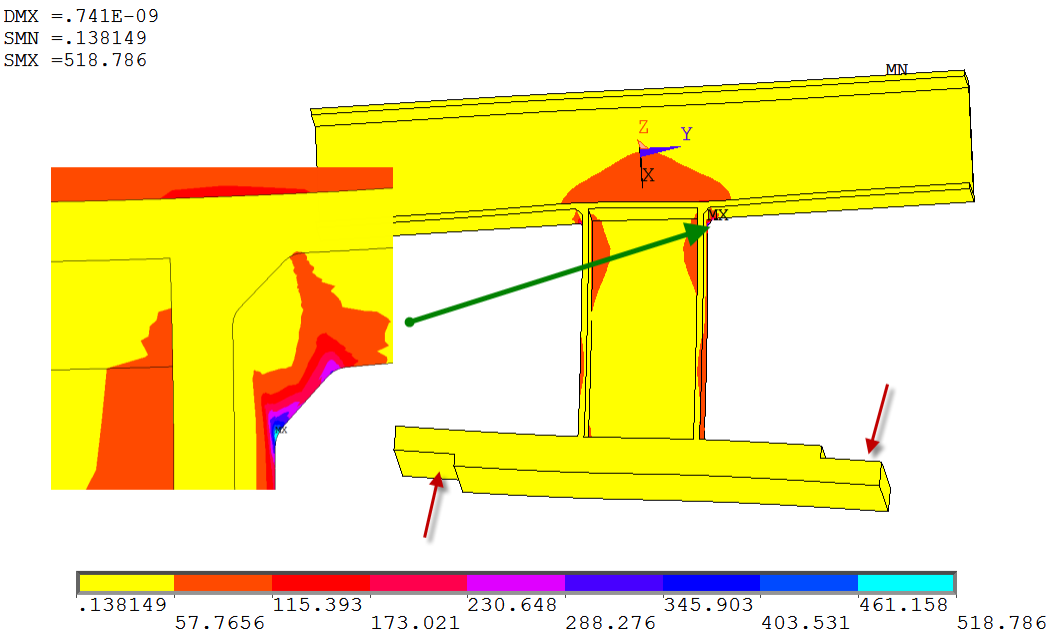


Рис. 1. Схема нагружения сварного узла рамы

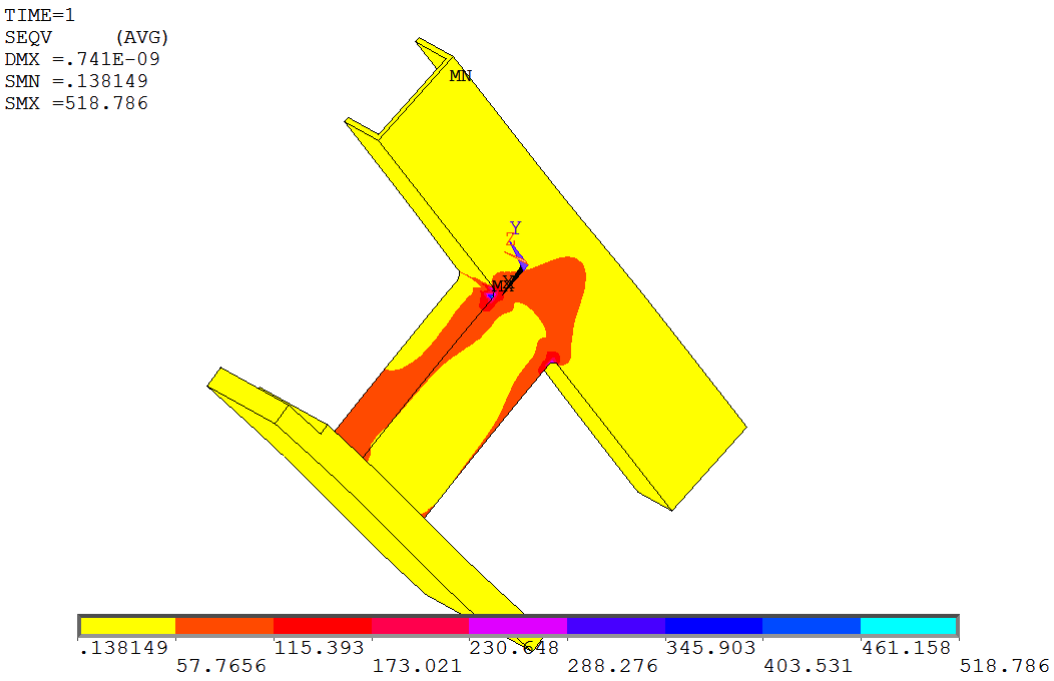


Рис. 2. Интенсивность напряжений по Мизесу в сварном узле рамы, составленной из труб прямоугольного сечения

Высокий уровень напряжений требует четкого выполнения инструкции по наложению сварных и швов и накладывает помимо сварки жесткие требования на геометрию свариваемых балок и способ механической обработки торцов балок (труб профильного сечения) [11].

При несоблюдении допусков по отклонениям, при сборке деталей под сварку, возможно образование дефектов и трещин в сварных швах такого типа соединений. Для их выявления необходимо проведение визуального и измерительного контроля для выявления поверхностных дефектов и отклонения геометрии сварного шва от требования нормативно-технической документации, а также ультразвукового контроля для выявления внутренних дефектов в сварном шве.

Таким образом, традиционное использование балок или труб профильного сечения снижает технологичность производства и требует повышенных классов точности на их сборку и сварку. Представляется логичным постепенный переход на трубы круглого сечения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 между Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральным государственным унитарным предприятием «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Библиографический список

1. Пашков, Ю.И. Разработка классификатора дефектов для сварных труб / Ю.И. Пашков, В.А. Лупин, М.А. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15. – С. 37–40.

2. Лупин, В.А. Проблемы лавинных разрушений газопроводов из сварных труб и способы их предотвращения / В.А. Лупин, Ю.И. Пашков, М.А. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15. – С. 26–27.

3. Пашков, Ю.И. Остаточные сварочные напряжения и пути снижении стресс-коррозионных разрушений магистральных газопроводов / Ю.И. Пашков, М.А. Иванов, Р.Г. Губайдулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15. – С. 28–30.

4. Иванов, М.А. Методология расчета геометрических размеров сварных швов по параметрам режимов автоматической дуговой сварки под слоем флюса / М.А. Иванов, А.М. Уланов // IX International congress: Machines, Technologies, Materials 2012. Section «Technologies». –Bulgaria: Varna, 2012. –Vol. 1. –С. 86–88.

5. Уланов, А.М. Современный подход к разработке технологических параметров сварки в производстве труб большого диаметра / А.М. Уланов, М.А. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19, № 39. – С. 154–155.

6. К вопросу влияния погонной энергии сварки на скорость охлаждения металла шва / М.А. Иванов, А.М. Уланов, В.В. Роде, П.А. Данилкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19, № 39. – С. 159–160.

7. Иванов, М.А. Температурные поля изложницы при литье однотонных блоков цилиндра / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». − 2005. − Вып. 6, № 10 (50). – С. 99–101.

8. Развитие теории трещиноустойчивости отливок / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Е.Л. Волосатова, Д.В. Изотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». − 2011. − Вып. 17, № 36 (253). – С. 48–50.

9. Гузеев, В.И. Нестационарность напряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы, обусловленная деформациями в зоне сдвига / В.И. Гузеев, Д.Ю. Пименов // Технология машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 20–24.

10. Изменение напряженного состояния задней поверхности зуба фрезы при торцевом фрезеровании / Д.Ю. Пименов, В.И. Гузеев, А.А. Кошин, П.П. Переверзев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 78–80.

11. Пименов, Д.Ю. Определение допустимого износа торцевых фрез для обеспечения требуемой точности / Д.Ю. Пименов, В.И. Гузеев, В.А. Пашнёв // Вестник машиностроения. – 2012. – № 10. – С. 68–72.

12. Ердаков, И.Н. Исследование процесса изготовления литой плиты методом планируемого эксперимента / И.Н. Ердаков, В.М. Ткачев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 15, № 34 (210). – С. 46–49.

13. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающий аспект в производстве литых плит из стали Гадфильда / И.Н. Ердаков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 11. – С. 3–5.

14. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве / И.Н. Ердаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – № 39. – С. 139–141.

15. Метод измерения температур в исследовании характера затвердевания отливки / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов, И.В. Саламатов, Л.Н. Сабирова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2012. – № 39. – С. 124–144.

УДК 621.774.37

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ

К.Ю. Яковлева

В ходе предварительного анализа моделируемой системы «волока – оправка – очаг деформации» выбраны определяющие параметры и параметры отклика системы, сформулирован перечень основных упрощений и допущений.

Ключевые слова: волочение труб, оправка, моделирование

Прецизионные холоднодеформированные трубы малого диаметра, в том числе с заданным внутренним диаметром, являются продукцией специального назначения, основными потребителями которых являются крупные приоритетные подотрасли машиностроения: точное и энергетическое машиностроение, авиация и судостроение, космическая техника, ядерная энергетика, автомобилестроение, химическая промышленность, ВПК и другие. В последние годы спрос на трубную продукцию данного назначения увеличился с одновременным повышением требований потребителей к уровню эксплуатационной надежности и долговечности машин и агрегатов, что соответственно привело к ужесточению требований к точности размеров, уровню механических свойств и качеству поверхности труб.

Одним из способов изготовления данной трубной продукции является процесс монолитного волочения труб на самоустанавливающейся оправке.

Интерес к данному способу волочения труб подтверждается многочисленными исследовательскими работами, в том числе с использованием средств компьютерного моделирования [1]. Широкое распространение волочение на самоустанавливающейся оправке получило при изготовлении медных и алюминиевых труб [2–4 и др.]. Однако применения в промышленных масштабах в доле сортамента стальных и особенно труб из коррозионно-стойкой стали данный способ волочения труб не нашел, что зачастую обусловлено необходимостью изготовления оправок из высокопрочных материалов, например твердых сплавов, обработка которых требует специализированного оборудования (особенно в случае изготовления труб малого внутреннего диаметра).

Особенностью процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке является профилировка оправки, содержащая в общем случае два рабочих участка – цилиндрический и конический. Удерживается самоустанавливающаяся оправка в очаге деформации за счет равенства действующих на нее втягивающих и выталкивающих сил. Однако известно, что рав-

новесное ее положение на практике труднодостижимо: оправка может совершать осевые перемещения не только в начальный момент волочения, но и в установившемся режиме, причем последнее обусловлено нестабильностью толщины стенки труб, а также изменениями условий смазки на контактной поверхности металла с инструментом [5, 6]. Анализ имеющейся информации по этим вопросам показал, что реализация данного способа волочения труб в стабильном режиме является комплексной задачей и требует комплексных решений с привлечением теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретическое исследование волочения труб на самоустанавливающейся оправке будет основано на аналитическом описании (математическом моделировании) данного процесса с привлечением теоретических соотношений механики сплошных сред.

Целью математического моделирования является уточнение положения оправки в очаге деформации, путем численной оценки силовых параметров процесса.

Объектом математического моделирования является система «волока – оправка – очаг деформации», в которой более подробного изучения требует подсистема «Очаг деформации».

На сегодняшний день сложилось 2 подхода к разбиению деформационной зоны на участки, отличающиеся наличием или отсутствием участка безоправочного волочения в зоне перехода конусной части оправки в цилиндрическую. Будем рассматривать очаг деформации без вторичной зоны безоправочного волочения, аргументируя это относительно малой протяженностью данного участка, определяемой в значительной степени механическими свойствами обрабатываемого материала [4, 7, 8].

Важным вопросом является определение положения оправки относительно волоки. Известно, что в процессе деформации оправка совершает в осевом направлении колебательные движения небольшой амплитуды, достигая так называемых *крайних переднего* и *заднего* положений, что в свою очередь способствует изменению направления действия сил трения и соответственно напряжению волочения. Между этими положениями очаг деформации имеет 4 зоны. Причем протяженность зоны контакта металла трубы с конусом волоки и цилиндром оправки будет определяться параметром возможных осевых перемещений оправки. Существуют различные методики определения положения оправки в очаге деформации [3, 4, 9 и др.]. В процессе моделирования для определения возможных осевых перемещений оправки будем пользоваться зависимостью, приведенной в работе [3].

К определяющим параметрам, оказывающим влияние на условия протекания процесса оправочного волочения, отнесем следующие:

– размеры поперечного сечения заготовки и готовой трубы;

– степень относительной деформации;

– переднее натяжение (напряжение волочения) σ_1;

– сопротивление металла пластической деформации σ_s;

– коэффициенты трения на поверхности контакта металла трубы с волокой и оправкой $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{опр}}$ соответственно.

Согласно цели моделирования наиболее показательными параметрами стабильности процесса будут силовые параметры, соответственно в качестве параметра отклика рассматриваемой системы будем использовать напряжение волочения σ_1, значение которого согласно условию осуществления процесса волочения должно быть меньше истинного значения предела текучести металла $\sigma_{\text{т}}$, т. е. $\sigma_1 < \sigma_{\text{т}}$.

Примем следующую систему упрощений и допущений:

1. Рассматривать систему «волока – оправка – очаг деформации» будем в цилиндрической системе координат, что позволит свести задачу к плоской.

2. Примем, что деформируемый металл несжимаем, т. е. выполняется условие: $\xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = 0$.

3. Примем, что деформируемый металл идеально пластичный.

4. Примем, что металл в процессе холодной деформации упрочняется согласно зависимости $\sigma_s = \sigma_s^{\text{исх}} + a\,\varepsilon - b\,\varepsilon^n$ [10].

5. Примем, что на контакте металла с инструментом коэффициент трения $f = \text{const}$.

6. Примем, что технологический инструмент (волока и оправка) – абсолютно жесткие тела, т. е. в процессе деформации технологический инструмент не подвергается упругому сплющиванию.

7. Пренебрежем трением в элементах механической трансмиссии и примем, что динамические скачки во время работы механической трансмиссии отсутствуют, т. е. система жесткая.

Проведенный таким образом предварительный анализ моделируемой системы показал, что актуальной задачей теоритического исследования процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке является определение силовых параметров, которые в первом приближении позволят (в сравнении с экспериментальными данными) понять корректность представлений о положении оправки в очаге деформации.

Библиографический список

1 Спиридонов, В.А. Моделирование процесса волочения труб на самоустанавливающейся оправке с помощью программного комплекса DEFORM-3D / В.А. Спиридонов, В.С. Паршин, М.И. Мамелин // Высокие технологии, образование, промышленность: сб. ст. 11 Междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких техно-

логии в промышленности», СПб., 27–29 апр., 2011. – СПб.: СПбГПУ, 2011. – Т. 1. – С. 432–434.

2 Логинов, Ю.Н. Исследование соотношения деформаций при волочении толстостенных и тонкостенных медных труб / Ю.Н. Логинов, М.С. Шалаева, А.С. Овчинников // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 31–35.

3 Шапиро, В.Я. Бухтовое волочение труб / В.Я. Шапиро, В.И. Уральский. – М.: Металлургия, 1972. – 264 с.

4 Биск, М.Б. Волочение труб на самоустанавливающейся оправке / М.Б. Биск, В.В. Швейкин. – М.: Металлургиздат, 1963. – 128 с.

5 Панфилов, Р.Г. Волочение тонкостенных труб из двухслойных материалов с утонением стенки: дис. … канд. техн. наук: 05.03.05 / Панфилов Родион Геннадьевич. – Тула, 2006. – 160 с. – 6106-5/3189.

6 Собачкин, В.В. Моделирование трения при волочении трубы на самоустанавливающейся оправке / В.В. Собачкин, В.М. Душкин // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2006. – № 2. – С. 17–19.

7 Биск, М.Б. Холодная деформация стальных труб. В 2 ч. Ч. 1: Подготовка к деформации и волочение / М.Б. Биск, И.А. Грехов, В.Б. Славин. – Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1976. – 232 с.

8 Осадчий, В.Я. Определение напряжения волочения при деформации трубы на плавающей оправке / В.Я. Осадчий, Н.А. Малевич // Производство проката. – 2007. – №2. – С. 38–41.

9 Паршин, В.С. Холодное волочение труб / В.С. Паршин, А.А. Фотов, В.А. Алешин. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.

10 Савин, Г.А. Волочение труб: учеб. пособие для ПТУ / Г.А. Савин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1993. – 336 с.

ФАКУЛЬТЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ

УДК 622.322

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУРОГО УГЛЯ

А.Г. Реш, К.В. Голубкова

Рассмотрены вопросы промышленного использования низкосортного бурого угля.

Ключевые слова: бурый уголь, угольная промышленность, экологические проблемы.

Угольная промышленность – часть топливно-энергетического комплекса страны. На основе углей вырабатывается свыше 20 % электрической энергии и удовлетворяется 50 % спроса коммунально-бытового хозяйства в топливе. В настоящее время в России очень актуальна тема рационального использования низкосортного твердого топлива – бурого угля, в стране имеется большое количество его запасов, а реализовать их становится все труднее, вследствие наличия низких потребительских свойств. По своим характеристикам и теплотворным свойствам бурый уголь уступает каменному углю: имеет повышенную зольность и большое содержание летучих веществ, за счет чего склонен к самовозгоранию. Традиционное сжигание бурого угля приводит к загрязнению окружающей среды вредными веществами. Поэтому наиболее перспективным применением данного вида ископаемого – создание альтернативных топливных материалов на его основе. В мировой практике бурые угли уже давно перерабатывают по новым технологиям. Как сырье для получения топлива и газа, бурый уголь из-за своей дешевизны наиболее эффективен [1].

Содержание минеральных веществ в буром угле превышает их содержание в нефтяном сырье. При переработке бурого угля в синтетическое жидкое топливо необходимо применение совершенных процессов фракционирования и разделения углеводородной и минеральной составляющих. Современная технология получения синтетических жидких топлив из бурого угля представляет собой три стадии:

– процесс ожижения бурого угля. В размольно-смесительный аппарат загружается бурый уголь и модифицирующие добавки. В процессе размола и гомогенизации компонентов смеси осуществляется модификация бурого угля: изменяется высокомолекулярная структура, состав фрагментов, разрушаются электронно-донорно-акцепторные связи, что приводит к деполимеризации бурого угля и превращению его в жидкую углеводородную

смесь [2]. По физико-химическим свойствам полученная жидкая углеводородная смесь является близкой к нефти.

– очистка жидкого бурого угля от механических примесей, взвешенных частиц, солей, серы и других компонентов, подлежащих удалению.

– углубленная переработка жидкого бурого угля в синтетическое жидкое топливо.

Технология получения эмульсионного топлива включает следующие основные стадии: ожижение бурого угля, стабилизацию эмульсионной системы и термо-гравитационную очистку эмульсионной системы от механических примесей и взвешенных частиц. Установка термо-гравитационной очистки эмульсионной системы не имеет вращающихся, изнашиваемых частей и фильтров, отличается низкими энергетическими затратами и эксплуатационными расходами [1].

Полученная эмульсия имеет все необходимые регламентированные физико-химические свойства (низкая вязкость, низкие значения пределов текучести, предельная однородность каогуляционных структур). В ней содержится высокая концентрация горючей основы, достаточной для обеспечения высокой калорийности топлива. Применение эмульсионного топлива повышает экономичность энергоустановок как за счет снижения недожига , так и вследствие уменьшения загрязнения рабочих поверхностей нагрева в котлах(вода в зоне горения в виде перегретого пара способствует более тонкому распылению углеводородной основы – это приводит к практически полному ее выгоранию и к существенному снижению в отходящих газах сажи и вторичных углеводородов). Изменение механизма горения топливных эмульсий приводит к повышение общего КПД котла на 3–5 % [3].

Эмульсионное топливо – экологически чистый вид топлива, при его горении существенно снижается концентрация оксидов азота и серы.

Еще один способ получения топлива из угля – создание водоугольной суспензии или водоугольного топлива (ВУТ). Идея использования водноугольных суспензий в качестве топлива зародилась еще в 1950-х годах в Институте горючих ископаемых АН СССР [4].

Библиографический список

1. Мировая угольная промышленность – http://www.b-3.su/stati1/poleznaya_informaciya/mirovaya_ugolnaya_promyshlennost/2.

2. Бурый уголь – http://www.3.su/stati1/poleznaya_informaciya/ buryj_ugol/

3. Использование низкосортных бурых углей в малой энергетике – http://masters.donntu.edu.ua/2008/fema/krasilov/library/isp.html

4. Кривандин, В.А. Металлургическая теплотехника: учеб. для вузов: в 2 т. / В.А. Кривандин. – М.: Металлургия. – 592 с.

УДК 536.2.01.001.57

К ВЫБОРУ ФОРМЫ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

В.И. Горбенко, А.И. Грибанов, М.А. Юртаев

Приводятся результаты исследования форм расчетных сеток при численном решении задач теплопереноса.

Ключевые слова: теплоперенос, расчетная сетка

Вопросу выбора сеток разбиения изучаемой области в современной теории численного моделировании отводится недостаточно места. Вопросы, какими фигурами «паркетить» изучаемую область или «мостить» моделируемое пространство остаются актуальными.

Выделим в потоке однородного вещества неподвижную относительно координатной системы некоторую область объёмом V. Согласно первому закону термодинамики для этой области с учетом необратимости процессов можно записать уравнение баланса энергии для потока вещества [1, 2]:

$$\int_F q(A)\cdot n(A)dF + \int_V q_v dV = \int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} dV , \qquad (1)$$

где q(A) – проекция суммарного теплового потока, входящего в рассматриваемую область через её поверхность F за счёт теплопереноса (теплопроводности, конвекции и излучения) на нормаль n в точке A ($A \in F$). Второе слагаемое здесь учитывает внутренние источники тепла. Правая часть уравнения (1) определяет изменение энтальпии объема V за промежуток времени $d\tau$.

Выражение (1) относится к прямым методам балансов энергии (МБЭ) потока в интегральной форме. Возникающие на практике нелинейные задачи, как правило, не поддаются точному решению ввиду сложности подынтегральных функций.

Приближённое решение уравнений (1) согласно МБЭ сводится к условному разбиению исследуемой области на M достаточно малые одинаковые элементы массой Δm_i (i =1, 2, …, M). Равенство масс для однородных веществ определяет одинаковость их объёмов ΔV_i . Ячейки могут иметь вышеперечисленные формы полностью заполняющих область V.

Для произвольного i-го элемента объёмом ΔV_i, а производную $\partial T/\partial \tau$ – конечно-разностной аппроксимацией $\Delta T/\Delta \tau$:

$$\sum_{j=1}^{N} q_j F_j + (q_v \Delta V)_i = (\rho C_p \Delta V)_i \frac{T_i' - T_i}{\Delta \tau} . \qquad (2)$$

Первое слагаемое в уравнении (2) определяет алгебраическую сумму тепловых потоков теплопереносом, входящих в i-ю ячейку через N её гра-

ней. Величина q_j есть проекция вектора плотности потоков на внутреннюю нормаль к поверхности F_j , соответствующей j-й грани ячейки (j = 1, 2, ..., N).

Правая часть уравнения (2) определяет изменение энтальпии ячейки за промежуток времени $\Delta\tau$. Здесь T_i – температура i-й ячейки в начале этого промежутка, а T_i' –температура i-й ячейки в конце этого промежутка.

Таким образом, система из M уравнений вида (2) является записью интегрального соотношения (1) в численной форме (i = 1, 2, …, M).

При генерации пространственной сетки исследуемой конструкции необходимо учитывать следующее. Очевидно, что с увеличением числа слагаемых в сумме $\sum_{j=1}^{N} q_j F_j$ уравнения (2) следует ожидать, что пространственная погрешность, вызванная дискретизацией задачи, будет снижаться.

Увеличение количества граней ячейки приводит к возрастанию числа каналов передачи тепла и повышает её «чувствительность» на тепловые воздействия со стороны соседних элементов.

Назовем соотношение теплопередающей (теплоотдающей) поверхности рассматриваемой i-й ячейки к ее объему *эффективностью* $f = \Delta F/\Delta V$.

Рассмотрим влияние f на различные сетки.

Для плоских задач в качестве поверхности ΔF ячейки выберем периметр P, а за объем V – поверхность элемента S. Тогда f = P/S.

Рассмотрим фигуры со стороной a, которыми можно замостить плоскость (рис. 1–5)

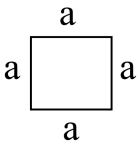


Рис. 1. Квадрат

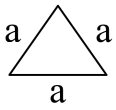


Рис. 2. Равносторонний треугольник

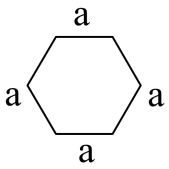


Рис. 3. Правильный шестиугольник

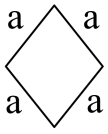


Рис. 4. Равносторонний четырехугольник

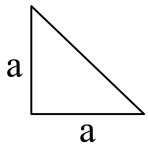


Рис. 5. Прямоугольный треугольник

В расчетной практике моделирование задач теплопереноса обычно используют прямоугольники, квадраты, равносторонние треугольники, ромбы и шестиугольники (рис. 1–5).

Особый интерес в качестве ячеек представляют фигуры – многогранники, которыми можно полностью замостить изучаемое пространство. В пространственных задачах используются: гексаэдр (куб), тетраэдр, октаэдр. В редких случаях используют: додекаэдр, икосаэдр, параллелоэдр (ПЭД).

Очевидно, большей эффективностью будут обладать такие сетки, ячейки которых имеют наибольшее число граней при одинаковых объемах.

Параметры фигур плоских сеток:

Квадрат со стороной $a_{кв}$:

$$P_{кв}=4\cdot a_{кв};\quad S=4\cdot a_{кв}^2;\quad f_{кв}=\frac{P}{S}=\frac{4}{a_{кв}}.$$

Аналогично определяются P, S и f для остальных фигур.

Сравнение квадрата (кв) с треугольником (тр):

Условие $S_{кв} = S_{тр}$;

$$a_{кв}=a_{тр}\frac{\sqrt[4]{3}}{2}\ ;\ f_{кв}=\frac{4}{a_{кв}}=\frac{8}{a_{тр}\sqrt[4]{3}}\ \rightarrow\frac{f_{тр}}{f_{кв}}=\frac{\sqrt[4]{27}}{2}\rightarrow f_{тр}\approx 1{,}14\cdot f_{кв}.$$

Аналогично сравниваются другие сетки.

Выводы по плоским сеткам:

1. Максимальную эффективностью имеет сетка из прямоугольных треугольников: $f_{пт} > f_{тр} > f_р > f_{кв} > f_ш$.

2. Чем меньше острый угол в ромбической сетке, тем выше эффективность этой сетки. Так, если принять параметр f у сетки с острым углом $\varphi = 60°$ за 1 ($f_{60}{}^0 =1$), то $f_{30}{}^0 \approx 1{,}316\cdot f_{60}{}^0$, а $f_5{}^0 \approx 3{,}15\cdot f_{60}{}^0$.

3. После сетки из прямоугольных треугольников наибольшую эффективность имеет сетка из ромбов $f_р$: $f_р > f_{тр} > f_{кв} > f_ш$.

4. Наименьшая эффективность принадлежит сетке из шестиугольников $f_ш$;

5. Принимая $f_ш$ за 1, получаем: $f_{пт}\approx 1{,}29\cdot f_ш$; $f_{тр} \approx 1{,}22\cdot f_ш$ $f_р \approx 1{,}55\cdot f_ш$; $f_{кв} \approx 1{,}07\cdot f_ш$.

6. Эффективность сетки из прямоугольных треугольников выше, чем квадратной сетки: $f_{пт} \approx 1{,}2\cdot f_{кв}$.

7. Принимая $f_ш$ за 1, получаем $f_р \approx 3{,}46\cdot f_ш$; $f_р \approx 1{,}22\cdot f_{тр}$; $f_{кв} \approx 1{,}07\cdot f_ш$.

8. Сетка из квадратов уступает треугольной сетке: $f_{тр} \approx 1{,}14\cdot f_{кв}$ и ромбической сетке $f_р \approx 3{,}23\cdot f_{кв}$.

9. Сетка из квадратов проще в расчетах и по эффективности превосходит сетку из шестигранников.

Пространственные сетки.

В качестве эталонов форм пространственных сеток рассмотрим часто используемые тела Платона (рис. 6–10).

Другие многогранники здесь не рассматриваются. Ячейки могут быть составлены из вышеперечисленных фигур. Другая причина связана со сложностью формы и редким ее использованием в практике.

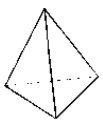


Рис. 6. Тетраэдр

Рис. 7. Куб

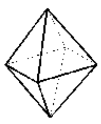


Рис. 8. Октаэдр

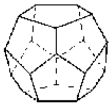


Рис. 9. Додекаэдр

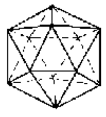


Рис. 10. Икосаэдр

Основные параметры этих фигур выразим через определяющий размер, сторону грани – а. Например, тетраэдр: $F = a^2 \cdot \sqrt{3}$; $V = \frac{a^3}{12}\sqrt{2}$; $f_{тт} = \frac{6\sqrt{6}}{a_{тт}}$.

Аналогично определяются f для остальных фигур.

Выводы по пространственным сеткам**:**

1. Максимальной эффективностью из рассмотренных сеток обладает сетка из тетраэдров $f_{тт}$.

2. Наименьшая эффективность принадлежит кубической сетке $f_{кб}$.

3. Принимая $f_{кб}$ за 1, получаем $f_{тт} \approx 1{,}2 \cdot f_{кб}$; $f_{тт} \approx 1{,}163 \cdot f_{ик}$.

4. Параметр $f_{кб} \approx 1{,}05–1{,}15$ и он эквивалентный сетке из октаэдров, додекаэдров.

Общие выводы:

1. Способ построения расчетной сетки, выбор формы и ориентации ячеек определяются, в конечном счёте, минимальным соотношением трудозатрат и точностью решения задачи.

2. Выбор формы ячеек сетки должен определяться наилучшим вариантом их компоновки на поверхности F или в объёме V, включая границу, с учётом требуемой детализации температурного поля.

3. На основе куба можно построить все другие виды правильных многогранников [4].

4. Сетка из квадратов проще в расчетах и по эффективности лучше сетки из шестигранников.

5. В ряде случаев предпочтение имеет ромбическая сетка.

Библиографический список

1. Горбенко В.И. Теоретические основы метода балансов энергии и вещества: учеб. пособие по дисциплине «Тепло-массообмен» / В.И. Горбенко. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – 44 с.

2. Горбенко, В.И. Численное моделирование температурных полей тел сложной формы на принципе диакоптики / В.И. Горбенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8, № 20(92). – С. 15–18.

3. Смирнов, Е.М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной формы / Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2. – Проблемы турбулентности и вычислительная гидромеханика.

4. Магомедов, К.М. Сеточно-характеристические численные методы / К.М. Магомедов, А.С. Холодов. – М.: Наука, 1988.

УДК 620.9.004.18(470.55)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИКЕ

А.И. Загидуллина, А.И. Грибанов

Рассмотрены вопросы использования альтернативного топлива в промышленности и энергетике.

Ключевые слова: водородная энергетика.

Водородная энергетика является одним из важнейших направлений перспективного развития топливно-энергетического хозяйства (рис.1). Она дает возможность полностью осуществить замкнутый цикл. Из воды получается водород, а при использовании водорода в качестве топлива, вновь образуется вода.

Водород может быть универсальным энергоносителем, способным заменить обычные виды топлива у различных потребителей – на электростанциях, в технологических установках промышленности, в коммунальном хозяйстве, в автомобильном, водном и воздушном транспорте, в космической технике.

Водородные топливные элементы считаются будущим мировой энергетики благодаря своей эффективности и экологической безопасности. Прямое преобразование химической энергии в электрическую не связано с ее превращением в теплоту, поэтому КПД топливных элементов составляет 70…90 %. Работа топливных элементов сопровождается выделением тепла, которое можно утилизировать.

В настоящее время огромное количество институтов и частных компаний занимаются повышением эффективности топливных элементов и снижением их себестоимости. Основной проблемой является увеличение скоростей анодных и катодных реакций и диффузии ионов путем подбора электролитов и катализаторов.

Водород является одним из дефицитнейших газов, потребность в котором постоянно растет. Основной способ получения водорода – конверсия природного газа, нефти и угля. Широкое применения водорода как энергоносителя станет возможным при разработке экономичных методов его получения из воды. Наиболее перспективно производство водорода в процессе электролиза воды с разложением ее на водород и кислород. Пока электролиз имеет ограниченное применение, так как связан с большими затратами энергии. В то же время достоинствами электролиза являются: высокая чистота водорода (до 99,99 %); простота технологии и возможность автоматизации процесса; доступное и неисчерпаемое сырье; возможность одновременного получения кислорода и тяжелой воды; физическое разделение водорода и кислорода в самом процессе. Возможен электролиз мор-

ской воды без ее обессоливания. В этом процессе на 500 МВт мощности генератора получается примерно 1700 т/сут водорода.

Находится в процессе изучения предложенный недавно электролиз воды совместно с газификацией угля. Протекают следующие реакции:

$2H_2O = 2H_2 + O_2$;

$C + 2H_2O = 2H_2 + CO_2$.

Электролизу подвергают угольную пульпу в воде. Параллельно идут две реакции – электролиз воды и окисление углерода. Получаемый водород и углекислый газ не содержат примесей.

Несмотря на то, что водородная энергетика не решает проблем энергообеспечения, ее развитие расширяет потенциальные возможности энергетики и позволяет уменьшить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.

Рис.1. Доли отраслей энергетики в США в 2003 г.[3]

Библиографический список

1. Скалкин, Ф.В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалкин, А.А. Канаев, И.З. Копп. – Л.: Энергоиздат, 1981.

2. Мановян, А.К. Технология переработки природных энергоносителей / Мановян А.К. – М.: Химия, Колос С., 2004.

3. eisensteinresource.blogspot.com

УДК 620.9.004.18(470.55)

ЭНЕРГОАУДИТ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ОАО «ПромГаз» Г. ЧЕЛЯБИНСКА

Т.Б. Жиргалова, Н.Н. Каргаполова

По результатам проведенных исследований предложены энергосберегающие мероприятия.

Ключевые слова: энергообследование, энергосбережение

Оценка эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, а также определение потенциала энергосбережения предприятия и способов его реализации – цель энергетического обследования предприятия.

Основными задачами энергетического обследования являются определение фактических показателей работы оборудования, сравнение их с нормированными значениями, анализ причин их несоответствия и разработка энергосберегающих мероприятий.

Энергетическое обследование состоит из нескольких, последовательно реализуемых этапов:

– сбор документальной информации;

– инструментальное обследование;

– обработка результатов обследования и их анализ;

– разработка энергосберегающих мероприятий и рекомендаций, оформление отчета.

На первом этапе происходит сбор документальной информации об объекте исследования: сведения об оборудовании котельной; динамика потребления энергоносителей; сведения о потребителях тепловой энергии и т. д. На этом этапе также определяются объем и точки замеров параметров энергоносителей.

Этап инструментального обследования необходим для восполнения недостающей информации по количественным и качественным характеристикам потребления энергоресурсов, а результаты обследования позволят оценить эффективность энергоиспользования.

Согласно Федерального Закона от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» был проведен энергоаудит крупного энергоснабжающего предприятия г. Челябинска ОАО «ПромГаз».

Особенностью энергетического обследования предприятия ОАО «ПромГаз» является то, что предприятие для осуществления своей основной деятельности использует разнообразные виды энергоресурсов. Предприятие осуществляет подачу природного газа промышленным предпри-

ятиям г. Челябинска (более 3 млрд нм^3/год), а также производит более 6000 Гкал/год теплоты в 4 собственных котельных, которую использует на собственные нужды и отпускает для нужд муниципального учреждения «Городская больница» и промышленного предприятия (более 2500 Гкал/год). Предприятие ОАО «ПромГаз» потребляет на собственные нужды более 2500 МВт·ч/год электрической энергии, которую покупает. Предприятие имеет также свой автомобильный парк, состоящий из 108 единиц техники, на который расходует более 239 тыс. л/год пропана, 84 тыс. л/год бензина и 68 тыс. л/год дизельного топлива.

Структурно предприятие включает в себя:

– основные производственно-ремонтные базы;

– газораспределительные станции и пункты, станции катодной защиты;

–энергетические объекты предприятия, обеспечивающие производство и распределение энергоносителей (котельные предприятия).

Исходя из специфики предприятия, большая часть покупной электроэнергии (62 % от общего потребления предприятия), расходуется:

- на 194 станции катодной защиты КСЭР-1,6;
- 35 станций катодной защиты КСЭР-3,0;
- 24 станции катодной защиты ПКЗ-АР-Е-1,2;
- 18 станций катодной защиты КСЭР-1,2;
- 64 системы телеметрии ГРС Шлейф 12 ГАЗ.

Тепловые нагрузки предприятия, расходы на собственные нужды и передачу энергии в форме теплоты потребителям, обеспечивают 4 котельные.

В котельной на производственной базе № 1 установлено 2 котла КВ-Г-2,5-115, на производственной базе № 2 – 4 котла МИКРО-100, на производственной базе № 3 – 2 котла Wester WG-80S, на производственной базе № 4 – 3 котла Rapido F200. Котлы КВ-Г-2,5-115 оснащены ручным двухпозиционным переключателем, на остальных котлах предусмотрены автоматические системы регулирования температуры теплоносителя. Все котельные, находящиеся на балансе предприятия, используют в качестве топлива природный газ. На производство тепловой энергии предприятие расходует 900 тыс. нм^3/год природного газа.

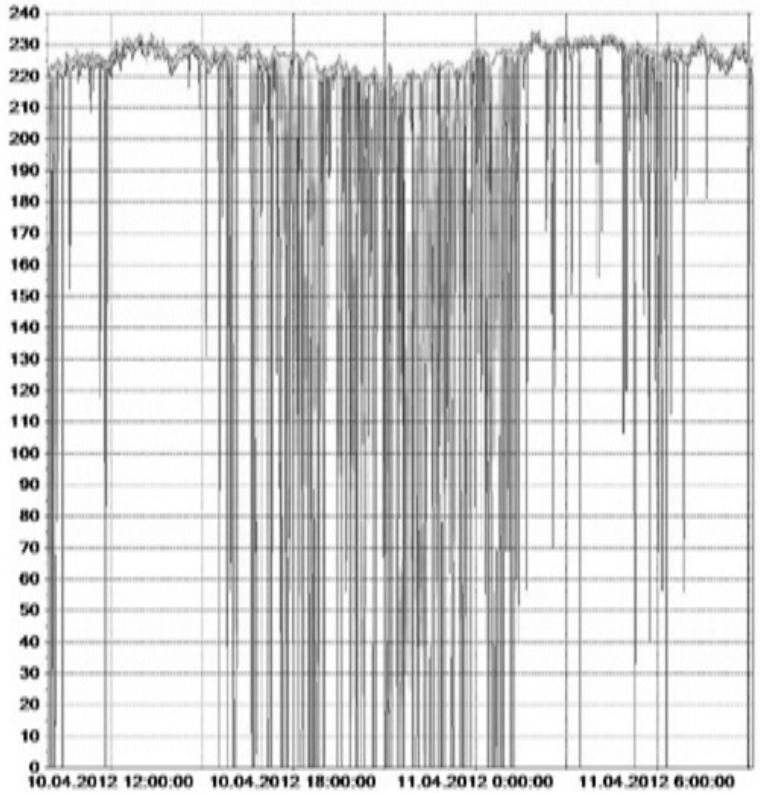
При инструментальном обследовании предприятия использовались следующие измерительные системы:

- тепловизор Fluke Ti25;
- анализатор качества электрической энергии АКЭ-824;
- ультразвуковой расходомер жидкости «Portaflow – 220»;
- люксометр Testo-540;
- цифровой измеритель температуры и влажности Fluke 971;
- пирометр Testo 830-T1.

На основании анализа данных, полученных в результате измерений на различных объектах предприятия, были выявлены недостатки.

- Тепловизионная диагностика двигателей компрессоров, установленных на ГРС, показала, что при работе в номинальном режиме происходит перегрев более 10 двигателей. Это позволяет сделать вывод о нарушении режима работы двигателя.
- Замер качества получаемой от поставщика электроэнергии (анализатор качества электрической энергии АКЭ-824) показал, что напряжение в течении суток изменялось от 230 В до 0 В (см. рисунок), что является недопустимым при эксплуатации электропотребляющего оборудования. Полученные данные дали основания для предъявления иска поставщику электроэнергии.
- Расчеты, выполненные по данным комплексной тепловизионой диагностики всех зданий и помещений, показывают, что на производственно-ремонтных базах предприятия происходил перерасход тепловой энергии на нужды отопления, из-за отсутствия регулирования подачи теплоносителя.
- Данные замеров расходов жидкости не совпадают с показаниями водосчетчиков (показывают заниженные расходы), что требуют их внеочередного обследования.

Для достижения нормативных показателей с целью энергосбережения и повышения энергетической эффективности были предложены мероприятия, представленные в таблице.



Броски напряжения

Рекомендуемые энергосберегающие мероприятия

№ п/п	Наименование мероприятия	Ожидаемый экономический эффект	Срок окупаемости мероприятия
1	Применение частотного электропривода на сетевых насосах котельной	Экономия 45990 кВт·ч электрической энергии в год	0,5 года
2	Установка крышного ветрогенератора	Получение более 75 тыс. кВт·ч возобновляемой энергии	1,3 года
3	Строительство котельной для производства тепла на собственные нужды на производственную площадку № 5	Производство 700 Гкал тепловой энергии для восполнения собственных нужд	0,6 года
4	Восстановление теплоизоляционного покрытия наружной теплотрассы с помощью скорлуп из пенополиуретана	Экономия 120 Гкал тепловой энергии при передаче	4,6 лет
5	Замена газовых горелок БИГ 2-14 на газовые горелки Blu 2000.1 PR - MD в котельной производственной площадки № 1	Экономия 94 тыс. $нм^3$ газа	5,9 лет
6	Проведение наладочных работ на котлах в котельной на производственных площадках № 3 и № 4	Экономия 132,5 тыс. $нм^3$ газа	0,3 года

Библиографический список

1. Федеральный Закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

2. ГОСТ Р 54852–2011. Здания и сооружения. Методы тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.

3. Приказ Минэнерго РФ «О внесении изменений в требования к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации, и правил направления копии энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования» от 08 декабря 2011 г. N 577.

УДК 620.9.001.12/.18(470.55)

ЭНЕРГЕТИКА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ В ЕЕ ПОСТУПАТЕЛЬНОМ РАЗВИТИИ

Л.Е. Лымбина

Показана роль поступательного развития в региональной энергетической стратегии для энергоемкой экономики Челябинской области. Сделан вывод, о том, что в ближайшее время увеличение генерирующих мощностей Южного Урала может произойти лишь за счет нового строительства, модернизации и реконструкции крупных тепловых энергоблоков.

Ключевые слова: энергетика, энергетическая безопасность, энергообеспечение, энергоэффективность, когенерация.

Энергетика – базовая отрасль российской экономики, обеспечивающая тепло- и электроэнергией внутренние потребности народного хозяйства и населения, осуществляющая экспорт в страны ближнего и дальнего зарубежья. Устойчивое развитие и надежное функционирование отрасли во многом определяют энергетическую безопасность (ЭБ) страны и являются важными факторами ее успешного экономического развития. С ЭБ связаны не только экономическая, но и политическая, а также техногенная безопасность государства. ЭБ можно рассматривать как защищенность граждан, и государства в целом от угроз дефицита всех видов энергии и энергоресурсов, которые могут возникать по причинам негативных воздействия природных, техногенных, управленческих, социально-экономических, внутри- и внешнеполитических факторов [1].

Даже один природный фактор, что Россия является самой холодной страной в мире (среднегодовая температура t = –5,5 °С, для сравнения в Канаде t = –5,1 °С), играет немаловажную роль в энергетической стратегии страны и ее регионов. Как известно, одним из показателей сурового климата страны является температура «на душу населения»: усредненная температура всех регионов к ее населению. Население России мигрирует и если миграция населения идет в холодные регионы, то «среднедушевая» температура падает, а если в «теплые регионы», то наоборот – растет. Миграционная же политика СССР увеличила разрыв по «душевой» температуре: в то время как Канада «теплела» на 1 °С, а США – на 2,5 °С, Россия стала «холоднее» на 1,5 °С. По расчетам некоторых экспертов, падение среднедушевой температуры на 1,5 °С приводит к затратам энергии, снижению производительности и к потерям не менее чем 1…2,5 % роста ВВП ежегодно, что составляет только часть цены холодного климата без учета потерь других факторов: здоровье населения, транспортные издержки и др.

Важность поступательного развития топливно-энергетического комплекса РФ и ее регионов обусловлена высокой значимостью энергетики, когда одним из основных механизмов регулирования энергосистемы регионов являются региональные энергетические стратегии.

По рейтингу регионов России по уровню энергодостаточности, рассчитанного экспертами РИА Рейтинг на основании данных «Системного оператора Единой энергетической системы» и Росстата по итогам 2012 года самым энергообеспеченным регионом России стала Тверская область, что было обусловлено запуском в эксплуатацию четвертого энергоблока Калининской АЭС. Челябинская область вошла в список регионов РФ с дефицитом электроэнергии и высокими нагрузками энергосистем.

Челябинская область является одним из наиболее крупных в экономическом отношении и энергоемких субъектов Российской Федерации: черная и цветная металлургия; машиностроение и металлообработка; атомная, радиоэлектронная, химическая, легкая, пищевая промышленность; стройиндустрия, сельское хозяйство; один из крупнейших транспортных узлов России. Природные ресурсы представлены крупными месторождениями железных, медных, никелевых, сидеритовых руд, нерудного сырья, минерально-строительного (магнезитового и цементного) сырья, имеются запасы бурого угля. Энергетика области включает добычу бурого угля, здесь больше всего в России «атомградов», мощные тепловые системы и электростанции.

При такой нагруженной инфраструктуре Челябинская область всегда развивалась в условиях дефицита собственных энергоисточников. Генерирующие мощности покрывают постоянно растущие потребности в электрической энергии лишь на 70 %. Энергодефицит восполняется перетоками из Свердловской, Башкирской и Оренбургской энергосистем ОЭС Урала.

Для обеспечения энергетической безопасности региона и страны в целом необходимо решение двух первоочередных проблем**:** первая – технологическая модернизация существующих производственных мощностей, коренная их реконструкция в направлении внедрения энергосберегающих технологий, создание новых мощностей с использованием лучших энготехнологий. Вторая – изменение структуры потребления и размещения производства топливно-энергетических ресурсов: атомная и гидроэнергии, угольная продукция и использование возобновляемых источников.

Потребление энергии по оценкам экспертов в Челябинской области будет только расти. Покупная электроэнергия всегда дороже собственной, при этом снижается конкурентоспособность региона. Поэтому в последние годы основные усилия в энергетической отрасли область направляет на строительство, модернизацию, реконструкцию объектов генерации, в том числе с участием инвесторов. Энергоэффективность региона определяется прежде всего источниками электро- и теплоснабжения.

Основные энергообъекты генерации в Челябинской области

Тепло- и электростанции Челябинской области	Установленная мощность		Вид топлива
	электрическая, МВт	тепловая, Гкал/ч	
Троицкая ГРЭС	2 059	315	Уголь, растопочное – мазут
Южноуральская ГРЭС	882	395	Природный газ, бурый уголь, мазут
Челябинская ТЭЦ-3	585,5	1325,6	Природный газ
Южноуральская ГРЭС-2 (в планах до 2014 г.)	839		Природный газ, резервное – дизельное топливо
Челябинская ТЭЦ-2	320	1111,8	Уголь, природный газ
МТЭЦ, ММК, Магнитогорск	300	590	Уголь, природный газ
ТЭЦ, Челябинский металлургический комбинат	229	407	Доменный, природный, коксовый газы
ПВЭС, Магнитогорский металлургический комбинат	101		Доменный, природный, коксовый газы
Аргаяшская ТЭЦ	195	746	Уголь, природный газ
МЦЭС, Магнитогорский металлургический комбинат	191		Доменный, природный газы, каменноугольная смола
Челябинская ТЭЦ-1	149	1559,6	Уголь, природный газ
ПВЭС, Магнитогорский металлургический комбинат	101		Коксовый, доменный газы в смеси с природным
Челябинская ГРЭС	82	946,7	Природный газ
ТЭЦ, Миасский машзавод (Тургоякская ТЭЦ)	50	460	Природный газ, резервное – мазут
ТЭЦ, УралАЗ, г. Миасс	36		Газ
ТЭЦ, комбинат «Магнезит», г. Сатка	36		Природный газ
ГПУ, комбинат «Магнезит», г. Сатка	24	18,74	Природный газ
Магнитогорская ГТ ТЭЦ	20	80	Природный газ
ПСЦ, ММК, Магнитогорск	19	15	
ТЭЦ, Ашинский металлургический завод	14,5	150	Природный газ
ТЭЦ, Златоустовский машиностроительный завод	8	637,5	Природный газ, резервное – мазут

В ближайшее время увеличение генерирующих мощностей Южного Урала может произойти лишь за счет крупных тепловых энергоблоков:

– планируется ввести энергоблок мощностью 660 МВт на Троицкой ГРЭС (к концу 2015 г.);

– новая ПГУ-КЭС на строящейся Южноуральской ГРЭС-2: три блока по 400 МВт (к концу 2013, 2014 и 2015 годов соответственно);

– новый парогазовый энергоблок № 3 установленной мощностью 216,3 МВт на Челябинской ТЭЦ-3;

– строительство двух энергоблоков мощностью 247,5 МВт каждый на Челябинской ГРЭС;

– реконструкции основного энергетического оборудования на Челябинской ТЭЦ-1, ТЭЦ-2;

– в перспективе строительство ТЭЦ-4, ТЭЦ-5;

– строительство Южно-Уральской АЭС в перспективе.

Проблемы энергообеспечения Челябинской области ни малая энергетика, ни использование нетрадиционной энергетики принципиально решить не смогут – слишком энергоемкий промкомплекс Челябинской области.

Доля объектов малой энергетики в объеме производства электричества на территории Челябинской области оценивается на уровне 0,1 %. По данным президента Ассоциации малой энергетики Урала М. Загорнова в Челябинской области насчитывается порядка 50 газопоршневых ТЭС: одна из когенерационных ГПУ – мини ТЭС установленной мощностью 1,5 Гкал/ч на объекте ЮУрГУ; здесь же введена в эксплуатацию ГТУ, установленной мощностью 1,7 Гкал/ч.

Локальные энергоисточники конечно могут быть в Челябинской области достаточно востребованы в труднодоступных или отдаленных районах. Тем не менее, пока рано и однозначно говорить о бурном развитии и конкуренции в этом направлении.

Как показывает опыт использования нетрадиционной энергетики, в мире нет стран, где бы она составляла основу ТЭК, однако есть примеры, показывающие, что за счет ее использования могут покрываться нагрузки тепловой, электрической энергии.

По договору Правительства Челябинской области с ОАО «РусГидро» до 2020 г. в отдаленных и труднодоступных муниципальных образованиях горнозаводской зоны Челябинской области планируется построить 25 малых гидроэлектростанций, что позволит ежегодно производить до 50 млн кВт/час дешёвой электроэнергии при ежегодном экономическом эффекте более 100 млн рублей. Однако решение об установке мини-ГЭС около источников формирования водных артерий должно быть тщательно проверено и обосновано. Среди первоочередных проектов – строительство пяти ГЭС: в Аргаяшском районе на Аргазинском водохранилище, в Кусе, Нязепетровске, Сатке (на Порожском водохранилище), в Юрюзани.

На основании вышеизложенного, развивая эффективную когенерацию, Челябинская область получит дополнительные рыночные преимущества.

Библиографический список

1. Летягина, Е. Н. Энергетическая отрасль в условиях инновационного развития экономики / Е.Н. Летягина. – М.: Креативная экономика, 2011. – 144 с.

УДК 621.311.22:622.33

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

К.В. Осинцев

Рассмотрены различные варианты использования углей, залегающих в горной местности, в качестве основы для водоугольной суспензии.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, уголь, ТЭС

Водоугольная суспензия (ВУС) – смесь угольной пыли и воды с добавками поверхностно-активных веществ или без таковых, обладая текучими свойствами, способна перемещаться с помощью насосов по трубопроводам, распыливаться в топках на капли и гореть с образованием факела, что делает ее похожей на мазут, дизельное топливо и другие топливные жидкости [1–3]. Область прямого применения ВУС в энергетике – ТЭС и котельные, размещенные в районах, где по различным причинам отсутствует возможность строительства подъездных железных дорог, систем конвеерной доставки сухого угля, нет площадок для приема и хранения твердого топлива. Кроме того это могут быть ТЭС, принимающие кусковой уголь в потоке воды по трубопроводу с отделением крупных фракций и подачей их в традиционную систему пылеприготовления, а отстоявшийся шламовый остаток (разновидность ВУС) в форсунки котлов на факельную утилизацию. Возможна и факельная утилизация ВУС из отходов нефтемаслопродуктов с включением твердых угольных частиц на энергокотлах ТЭС и промпредприятий. Первые два случая, исходя из сложности доставки залегающих в горной местности углей, вполне адекватны к условиям Республики Кыргызстан.

В зарубежных проектах по промышленному использованию ВУС ориентируются на водоугольные суспензии, приготавливаемые из высококачественных малозольных, в частности, битуминозных углей с теплотой сгорания $Q^{p}_{н} \geq 35000$ кДж/кг, содержанием минеральных включений на сухую массу $A^{c} \leq 2$ %, выходом летучих на горючую массу $V^{г} \geq 40$ %, рис. 1 *а*, *б*. Суспензия их этих углей, имея высокое значение теплоты сгорания $Q^{p}_{н} \geq 24000$ кДж/кг при рабочей влажности $W^{p} \leq 30$ % и максимальном размере твердых частиц ~ 200 мкм, может экономно транспортироваться с мест добычи угля и приготовления до пользователя, долго храниться, не расслаиваться [1–3]. Разработчики проектов указывают на преимущества использования ВУС на пылеугольных ТЭС, связанные с упрощением технологии приема, хранения, подачи топлива на котлы, отмечают улучшение экологического состояния района размещения пылеугольных

ТЭС после перевода их на ВУС за счет снижения выхода в атмосферу мелкодисперсной золы и канцерогенных оксидов азота. Производство и поставку высокореакционных ВУС связывают с минимизацией суммарных затрат на гидродобычу, приготовление, гидротранспорт и стоимости твердого топлива. Многие важные для конструкторов факельных топок вопросы организации суспензионного сжигания, в том числе специфики воспламенения и поведения твердых топливных частиц в реальных промышленных установках практически не раскрываются.

Несмотря на активно проводимые исследования по горению ВУС, начатые в 50-х годах прошлого столетия, в том числе в СССР, в отсутствии промышленного опыта серьезно затруднялось ведение прогнозов по организации экзотермических процессов на котлах при использовании исходного топлива с иными теплотой сгорания, зольностью, размерами частиц. Опытно-промышленное сжигание ВУС было крайне необходимо, и в 80-х годах прошлого столетия в рамках крупной межотраслевой правительственной программы оно было проведено в СССР на котлах ПК-40 Беловской ГРЭС и ТП-35 Мин-Кушской ТЭЦ под руководством Хидиятова А.М., Джундубаева А.К., Осинцева В.В. При этом использовали ВУС с существенно ухудшенными (относительно ВУС битуминозного угля) теплофизическими свойствами и размерами частиц до 350 мкм, рис. 1 *а*, *б*. Подробное описание котлов и установок по приготовлению, подаче и распыливанию ВУС, как и результаты сравнительного сжигания пыли и суспензии ранее были приведены в открытой печати.

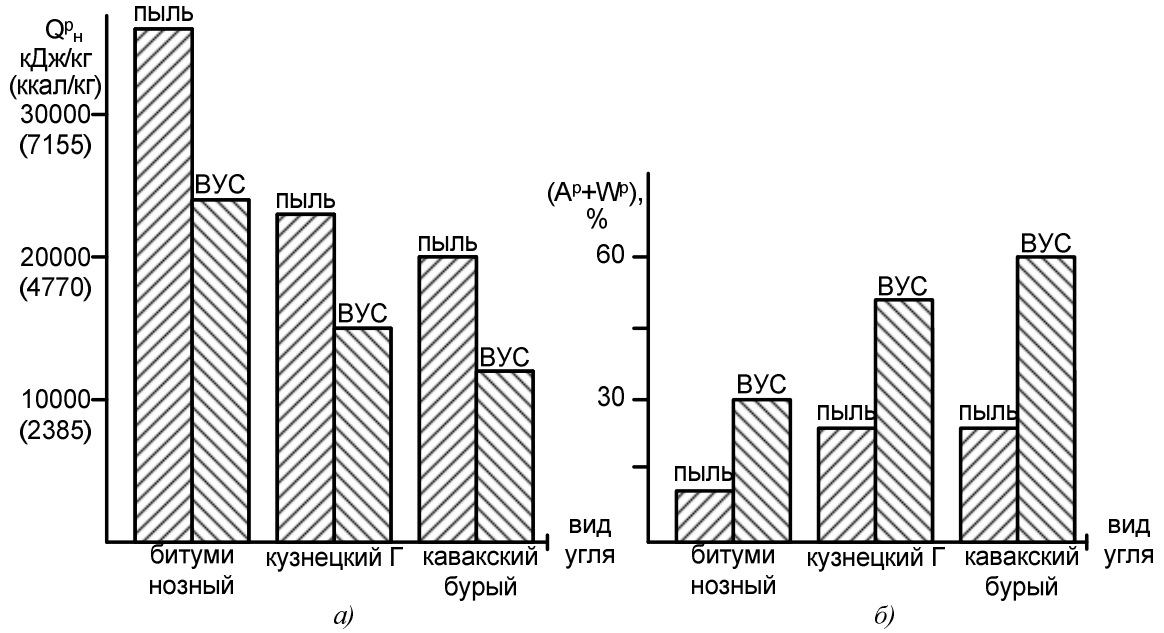


Рис. 1. Сравнение характеристик пыли и ВУС различных углей:
а – теплота сгорания; *б* – суммарный балласт минеральных включений и влаги

Проведенные испытания показали, что при распыливании ВУС в топке образовывался полидисперсный капельный факел. Капли при нахождении в высокотемпературной топочной среде прогревались, из них испарялась влага, выходили летучие вещества; прогревшиеся летучие вещества и твердотопливный коксовый остаток начинали реагировать с кислородом подаваемого через горелки воздуха (воспламенялись) с тепловыделением и повышением температуры. Последующее окисление (горение) капельного коксового остатка сопровождалось спеканием его отдельных частиц в золококсовые конгломераты. Переход от пылеугольного к суспензионному сжиганию сопровождался увеличением (растягиванием) длины участка воспламенения и снижением его температурного уровня. Это характерно для горения с пассивированием окислительного процесса на участке воспламенения инертным балластом: газами рециркуляции, паром, водой, избыточным количеством минеральных включений, а также их совокупностью [1–3]. Затягивание воспламенительного процесса приводило к затягиванию выгорания угольных частиц суспензионного топлива, повышению температуры продуктов сгорания, совокупному увеличению потерь теплоты с уходящими газами и мехнедожогом топлива.

В период испытаний котла ТП-35 основная масса пылевидного топлива, в частности кавакского угля, выгорает на горизонтальном участке факела перед горелками от их выходного сечения $l = 0$ до отметки $l_ф$, где степень выгорания $a = 0{,}9$. Здесь же развивается максимальный уровень температуры факела $T_ф$; на вертикальном участке факел охлаждается до фиксируемого на выходе из топки опытного значения $T = T^п_т = 1230$ К (параметр $T/T^п_т = 1{,}0$; $a = 0{,}95$). При подаче в топку распыленной суспензии из того же кавакского угля характер горения резко изменяется: участок воспламенения $l_ф$ увеличивается в 3 – 4 раза, а максимальная температура $T_ф$, снижается на 200 – 300 К. Пассивирование воспламенения вызывает затягивание процесса горения и летучих, и коксового остатка. В выходном окне топки температура факела становится выше ($T/T_т > 1{,}0$), а степень выгорания уменьшается до $a \le 0{,}82$. Заметим, что вышерассмотренный процесс горения в топке котла ТП-35 распыленных капель ВУС из кавакского угля с высоким содержанием влаги ($W^р \approx 50$ %) при низких тепловых напряжениях сечения зоны активного горения ($q_F \approx 1{,}2$ МВт/м^2) и лучистой поверхности ($q_{лг} \approx 0{,}6$ МВт/м^2) мог осуществляться только при подсветке, в частности, дизельным топливом в количестве 7 – 12 % по тепловыделению. Горение ВУС из кузнецкого угля с влагосодержанием $W^р \approx 40$ % на котле ПК-40, имеющим повышенное теплонапряжения зоны активного горения ($q_F \approx 3{,}0$ МВт/м^2; $q_{лг} \approx 1{,}05$ МВт/м^2), протекало без подсветки высокореакционным топливом. Прогоревшие более тяжелые и крупные в сравнении с отдельными пылевыми частицами золококсовые конгломераты с большой эффективностью улавливались в обычных золоуловителях перед

дымососами и дымовыми трубами, обуславливая снижение до 5–8 раз концентрации мелкодисперсной летучей золы в отводимых в атмосферу продуктах сгорания. В присутствии водного балласта пассивировались окислительные процессы, в том числе образования оксидов азота, рис. 2.

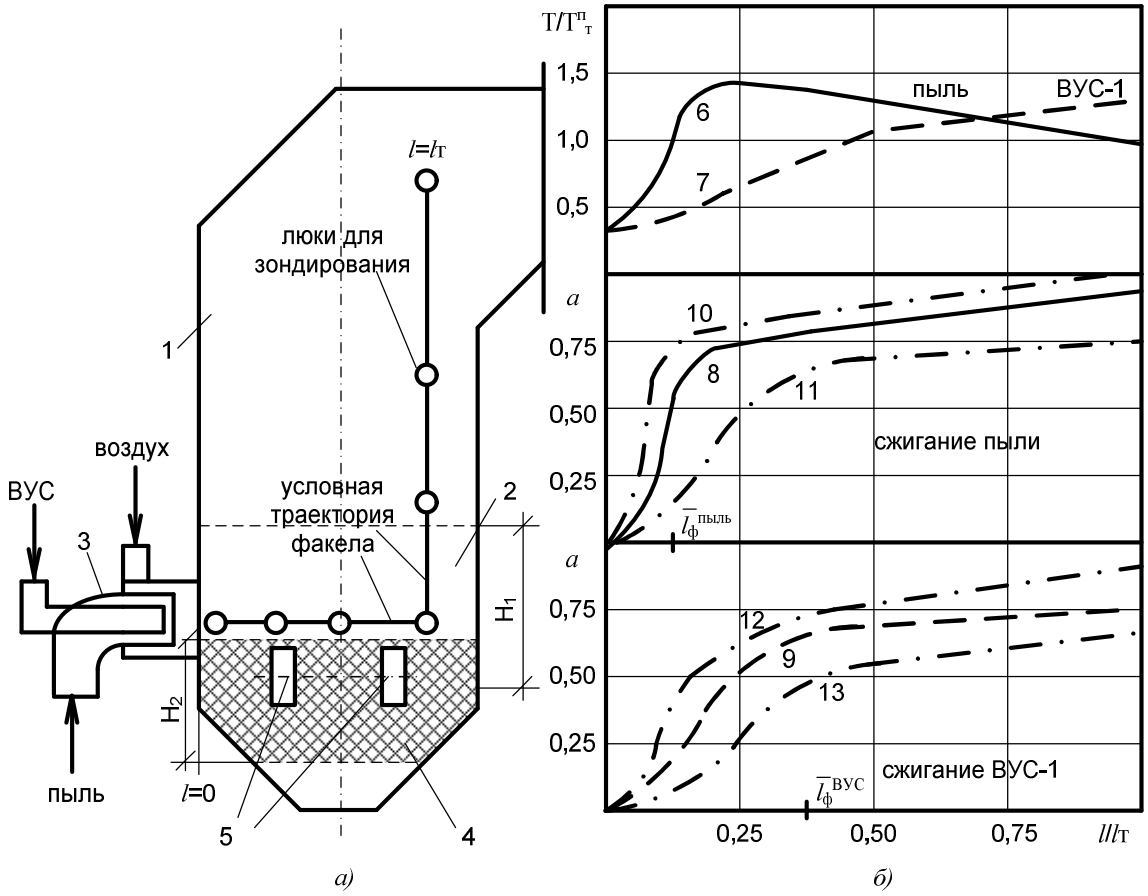


Рис. 2. Характер изменения безразмерных температуры ($T/T^{п}_{т}$) и степени выгорания топлива (а) в пылеугольном и суспензионном факелах кавакского бурого угля на котле ТП-35: 1 – топка, 2 – зона активного горения для пыли и ВУС в опытах, 3 – горелки для сжигания пыли и ВУС в опытах, 4, 5 – расчетные зона активного горения и горелки для мелкодисперсной ВУС, 6, 7, 8, 9 – интегральные кривые, 10, 12 – R < 90 мкм, 11, 13 – R > 90 мкм, 6, 8 – сжигание пыли с максимальным размером частиц 350 мкм, 7, 9 – сжигание ВУС с максимальным размером частиц 350 мкм

По результатам испытаний котлов ПК-40 и ТП-35 на ВУС был принят проект котла ТПЕ-214 Новосибирской ТЭЦ-5, предусматривающий помимо его основной работы на пыли возможность отработки суспензионного сжигания.

При проектировании новых котлов, работающих на ВУС, как на основном виде топлива, выбор температурного режима и величины поверхно-

стей нагрева, температуры продуктов сгорания, в том числе уходящих газов, осуществляется с учетом дополнительного балластного объема водяного пара с минимизацией потерь теплоты q_2 и устранением отклонения по Δq_2, появляющегося при испытаниях на существующих пылеугольных котлах. При использовании низкореакционных ВУС имеется возможность введения специальных добавок, повышающих активность горения ВУС в каплях, температурный уровень в зоне активного горения.

Библиографический список

1. Осинцев, К.В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 6. – С. 1–7.

2. Osintsev, K.V. Studying flame combustion of coal–water slurries in the furnaces of power-generating boilers / K.V. Osintsev // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Vol. 59, no. 6. – P. 439–445.

3. Организация факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергокотлов / К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: тез. докл. VIII Всерос. конф., Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 97.

УДК 621.181:622.33

КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АКТИВИРОВАНИЯ И ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОТЫ

К.В. Осинцев

Предлагается способ газофакельной термообработки исходного материала с получением активированного угля и несколько его реализующих установок, связанных технологически с котлами ТЭС.

Ключевые слова: активирование, ТЭС, уголь.

Одно из направлений использования киргизских углей – их активирование как для собственных нужд производства, так и для промышленных потребителей, в том числе зарубежных.

Используемый в качестве сорбента в системах химводоподготовки и стоков воды ТЭС активированный уголь имеет весьма высокую стоимость из-за больших расходов топлива, электроэнергии, потерь теплоты при его производстве [1, 2]. Снизить себестоимость активированного угля можно за счет отбора и использования части теплоты от тепловырабатывающей установки промпредприятия. Чтобы не нарушать технологический цикл основного производства тепловой энергии, расходная часть ее отбора на активирование не должна быть чрезмерно большой, но достаточной для выработки сорбционного материала, направляемого на собственные нужды, например, упомянутых систем ТЭС (группы ТЭС).

В основе способа – предварительное отделение угольной мелочи (до 1 мм) с выводом ее на основное пылесжигание в котлах, выделение узкий фракций 1–2 мм; 2–4 мм; 6–8 мм и т. п., подача их в топку на газофакельную термообработку с выделением влаги и летучих веществ, выводом готовых частиц потребителю.

Подобное требование к фракционированию вводимых частиц имеет теоретическое обоснование, в соответствии с которым процесс горения условно разбивается на последовательные временные периоды, привязанные к i-м частицам фиксированного размера δ_i, концентрации окислителя O_2, температурному фону в камере $T_г$ [3].

Первый период характеризуется безвоспламенительным нагревом i-той частицы с размером δ_i, при котором происходит выход влаги и природных горючих летучих веществ; он равен, с:

$$\tau_{вл\,i} = k_{вл} \cdot 5{,}3 \cdot 10^{14} \cdot T_г^{-4} \cdot \delta_i^{0,8}. \qquad (1)$$

Последующий нагрев той i-й частицы в среде со свободным кислородом вызывает воспламенение и выгорание летучих веществ; время выгорания составляет, с:

$$\tau_{гл\,i} = k_{гл} \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 \cdot \delta_i . \quad (2)$$

Начало окисления коксового остатка i-й частицы определяется временем, с:

$$\tau_{вк\,i} = k_{вк} \cdot 1{,}12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot \delta_i^{1,2} \cdot T_г^{-3} \cdot \left(21/O_2\right)^n . \quad (3)$$

Последний период связан с выгоранием коксового остатка, с:

$$\tau_{гк\,i} = f(O_2; T_г; \delta_i) . \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) $k_{вл}$, $k_{гл}$, $k_{вк}$ – опытные коэффициенты, ρ_y – плотность угля, кг/м^3, $n \approx 0{,}5$, δ_i – размер i-й частицы, м; O_2 – концентрация кислорода, %; $T_г$ – температура средняя в камере, К.

Временные технологические отрезки связаны между собой:

$$\tau_{вк\,i} = \tau_{вл\,i} + \tau_{гл\,i} + \Delta\tau_i , \quad (5)$$

причем $(\Delta\tau_i / \tau_{вк\,i}) \approx 0{,}1–0{,}15$.

Из (5) вытекает, что активирование i-й частицы можно связывать с двумя первыми периодами $\tau_{вл\,i}$ и $\tau_{гк\,i}$, а для вывода частиц из процесса с минимизацией обгорания коксового остатка следует ориентироваться на $\tau_{вк}$.

Полидисперсность топливного потока, используемая при организации воспламенения и последующего горения в топке, является основным препятствием в управлении процессом активирования и получении качественного сорбционного продукта. Если соотнести время активирования i-й частицы и частицы с максимальным размером δ^{max} по отдельным периодам (1)–(3), то для одинаковых условий можно получить близкие прямым зависимости:

$$\tau_{вл\,i} \approx \tau_{вл}^{max} \cdot \left(\delta_i / \delta^{max}\right)^{0,8} , \quad (6)$$

$$\tau_{вг\,i} \approx \tau_{вг}^{max} \cdot \left(\delta_i / \delta^{max}\right) , \quad (7)$$

$$\tau_{вк\,i} \approx \tau_{вк}^{max} \cdot \left(\delta_i / \delta^{max}\right)^{1,2} . \quad (8)$$

Опыт сжигания угля [4–7], как и расчеты по (1)–(8), показывают, что при ограничении времени пребывания в топке частиц со значительным размерным диапазоном фракции получить качественный угольный сорбент, конечно, затруднительно: мелочь прогорает полностью, а в крупных частицах фиксируется высокая степень недожога. Если на активирование вводить частицы с узким диапазоном размерной фракции 2–3 мм, 3–4 мм, 4–6 мм и т. д., это открывает путь к уменьшению обгорания угольного скелета частиц с уменьшением расхода исходного материала при необходимом качестве выпускаемого сорбента.

Схема одной из установок выработки активированного угля представлена на рисунке. Топка 1 имеет экранированные фронтовую 2, заднюю 3 и боковые 4, 5 стены, под с размещенной в нем механической решеткой 10 прямого хода, газовые горелки 7, установленные над решеткой 10, в част-

ности, в один горизонтальный ряд на боковых стенах 4, 5, примыкающие к фронтовой стене 2 устройства 8, 9 ввода исходного материала; под решеткой 10 имеются короба 11 ввода смеси воздуха и продуктов сгорания, в верхней части топки 1 – окно 13 вывода газо- и пылеобразных продуктов сгорания. Топка 1 может работать как на газе, так и угле. При сжигании угля на решетке 10 образуется шлак, удаляемый в систему 12 шлакоудаления.

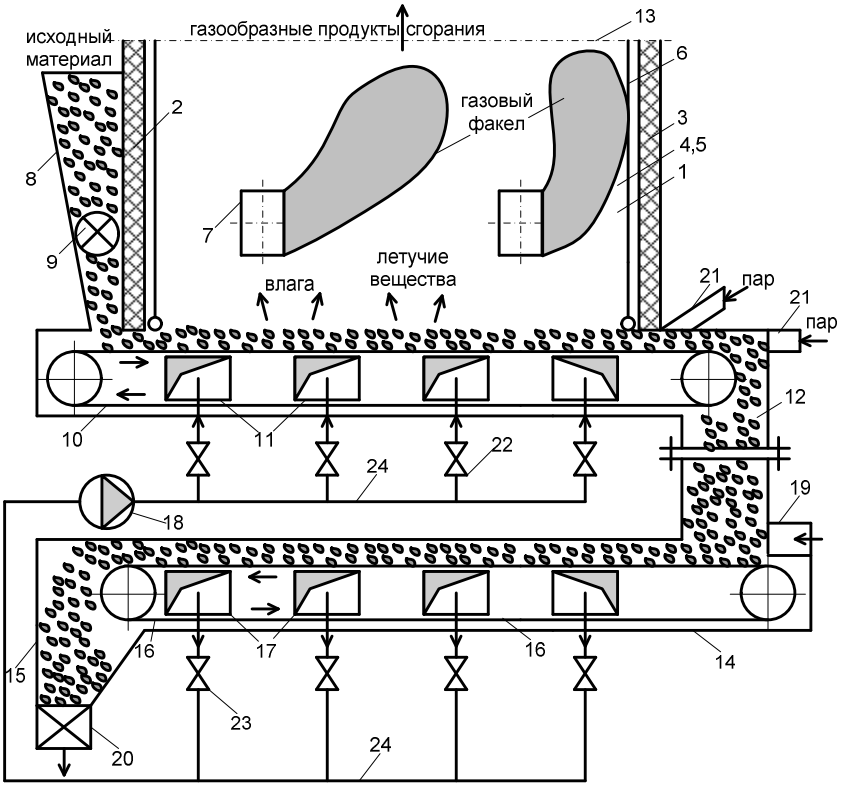


Рис. 1. Схема топки с механической решеткой, газовыми горелками и дополнительными системами охлаждения и вывода активированного материала: 1 – камера сгорания, 2, 3, 4, 5 – фронтовая, задняя и боковые стены соответственно, 6 – экранные трубы, 7 – газовые горелки, 8 – приемный бункер с исходным материалом, 9 – питатель, 10 – механическая, в частности, цепная решетка прямого хода, 11 – коробы ввода дутьевой смеси воздуха и газообразных продуктов сгорания, 12 – система вывода с решетки отработанного материала, 13 – выходное окно камеры сгорания, 14, 15 – дополнительные системы охлаждения и сбора активированного угля, 16 – решетка системы охлаждения, 17 – короба вывода газообразных продуктов, 18 – тяго-дутьевая установка системы охлаждения, 19 – узел ввода смеси воздуха и газообразных продуктов сгорания, 20 – питатель активированного продукта, 21 – сопловая система парового дутья, 22, 23 – индивидуальные регуляторы расхода газообразного рабочего агента, 24 – соединительные газоходы

Фракционный раздел должен быть организован до подачи в узлы ввода 8, 9 материала на решетку 10 топки 1 (см. рисунок). Отобранные фракции направляются в приемный бункер 8 исходных частиц, откуда через пита-

тели 9 потоками на решетку. В зависимости от размера подаваемой фракции регулируют скорость движения решетки 10. Нагрев частиц в топке осуществляется системой газовых факелов. Чтобы выдержать условия времени активирования, скорость движения решетки не должна превышать параметр $w \le l/\tau_{вкі}$, где l, w – длина рабочего участка и скорость движения решетки, м, м/с. Технология должна предусматривать паровое и воздушное дутье 19, 21, а также охлаждение, например, на решетке 16, сбор в бункере и отправку потребителю через питатель 20 готового материала (см. рисунок).

Системы охлаждения 14 и сбора 15 активированных частиц встраиваются в подтопочное пространство котла, рассчитанного на сжигание угля, при необходимости демонтируется с восстановлением исходной системы шлакоудаления 12. Схема на рис.1 предусматривает использование теплоты нагретой газовоздушной смеси 19 при охлаждении частиц в системе 14, вывод ее из-под решетки 16 и подачу под решетку 10 в топке 1 с использованием газоходов 24, тяго-дутьвеой установки 18 и регуляторов расхода 22, 23. Возможен вариант иной конструкции системы охлаждения, в том числе с использованием существующей системы шлакоудаления 12. В любом случае начальные капитальные затраты технологии много ниже, чем на отдельную установку активирования.

Библиографический список

1. Кинле, Х. Активные угли и их промышленное применение / Х. Кинле, Э. Бадер. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.

2. Углеродные адсорбенты из бурого угля Канско-Ачинского бассейна / А.О. Еремина, В.В. Головина, М.Ю. Учай и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 55.

3. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 210 с.

4. Controlling the thermal structure of the flame in the furnaces of BKZ-210-140F boilers with single-tier frontal arrangement of multifunctional burners when burning various kinds of fuel / V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, E.V. Toropov, K.V. Osintsev // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2005. – Vol. 52, no. 9. – P. 678–687.

5. Shifting the equipment of thermal power stations for firing different kinds of fuels in flames using the technology of distributed admission of reagents into the furnace / K.V. Osintsev, V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, and E.V. Toropov // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2008. – Vol. 55, no. 4. – P. 355.

6. Osintsev, K.V. Calculation of the flame initial area at the frontal direct injection in the combustion chamber / K.V. Osintsev // Thermal processes in engineering. – 2009. – Vol. 1, no. 9. – P. 379–383.

7. Osintsev, K.V. Changeover to low-temperature combustion of fuel in the boilers at cogeneration stations in Bishkek / K.V. Osintsev // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Vol. 59, no. 8. – P. 598–603.

УДК 621.181.7

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ СЖИГАНИЯ КОТЛОВ БКЗ-160 И БКЗ-220 ТЭЦ Г. БИШКЕК

К.В. Осинцев

Приводятся результаты анализа работы топочного оборудования котлов ТЭЦ г. Бишкек с различной организацией факельного сжигания топлива и даются рекомендации по рационализации ввода в топочные камеры потоков пылевоздушной смеси из мельниц и дожигающего вторичного воздуха.

Ключевые слова: котел, топка, многофункциональная горелка

Строительство и развитие ТЭЦ г. Бишкек начиналось с оснащения котлами БКЗ-160, потребляющими природный газ и мазут. Карагандинский промпродукт и близкий ему по свойствам ташкумырский каменный уголь рассматривались в качестве топливного резерва, используемого в короткий отопительный период времени. С учетом этого проект выполнен с минимизацией затрат на топливоподачу и пылеприготовление, исключен даже мельничный резерв, а в топке максимально сокращено количество разводок экранных труб под установленные в один ярус горелки, в каждой из которых по два пылевых канала с пылепитанием от различных мельниц (рис. 1, *а*, *б*). При такой компоновке увеличиваются тепловые напряжения сечения $q_F \approx 2{,}8$ МВт/м^2 и лучистой поверхности экранов $q_{лг} \approx 1{,}7$ МВт/м^2 в зоне активного горения против нормируемых для топок с твердым шлакоудалением значений $q^н_F \le 1{,}2$ МВт/м^2 отдельного горелочного яруса и $q^н_{лг} \le 0{,}8$ МВт/м^2, а также завышен температурный уровень факела в конце зоны активного горения на $\Delta T''_{аг} \ge 100$ К [1–3]. В этих условиях плавятся частицы топливной породы, активизируется процесс шлакования экранов, холодной воронки с забиванием шнеков шлакоудаления. Котлы в аварийном порядке останавливают на расшлаковку. Для улучшения ситуации на ряде котлов выполнена малозатратная реконструкция систем сжигания с организацией рассредоточенного ввода в зоны активного горения реагентных потоков, вызвавшая изменение характера горения пыли проектного угля со снижением температурного уровня факела, в том числе $T''_{аг}$. Это позволило снизить активность шлакования топочных камер, повысить до проектной величины паровую нагрузку котлов, уменьшить концентрацию оксидов азота в отводимых продуктах сгорания (рис. 1, *в*) [1].

Сегодня на ТЭЦ г. Бишкек сжигают угли других марок и месторождений, в том числе, небольшие партии бурого угля Каракечинского месторождения, частицы сопутствующей породы которого плавятся при пониженной температуре.

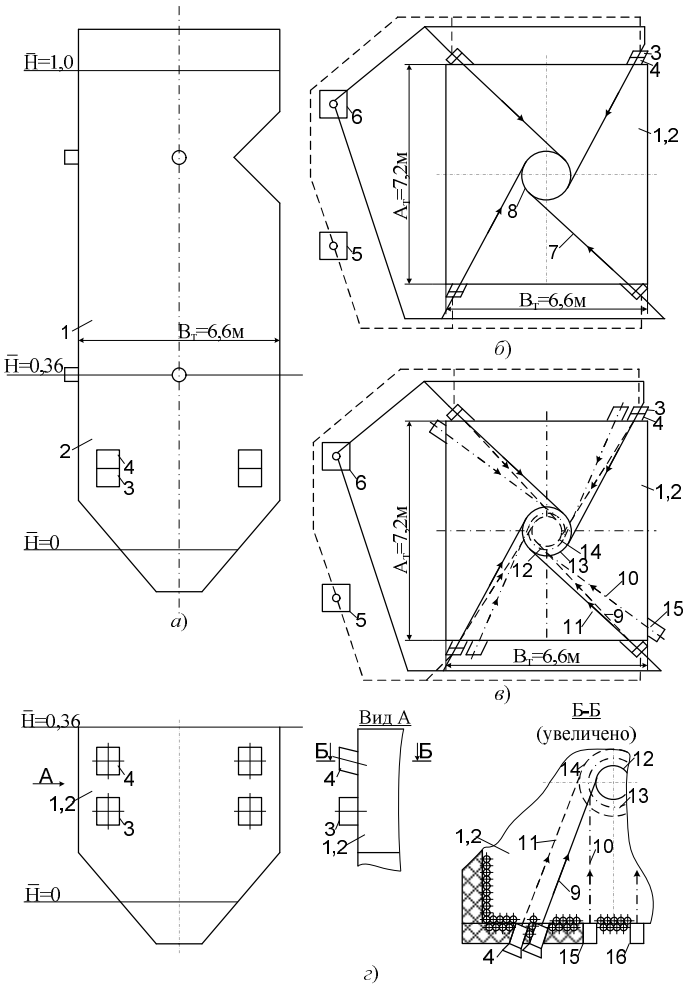


Рис. 1. Схема топки котла БКЗ-160: *а*, *б*, *в* – продольный и поперечный разрезы топки с существующими пылепроводами; *б* – ввод в топку однородной реагентной смеси; *в* – раздельный ввод реагентов в топку; *г* – вариантная схема компоновки многофункциональных горелок на боковых стенах топки; 1 – топка; 2 – зона активного горения; 3, 4 – горелки нижнего и верхнего ярусов; 5, 6 – мельницы; 7 – потоки реагентных смесей; 8 – условная окружность касания потоков 7; 9, 10, 11 – потоки пылевоздушной смеси, природного газа, воздуха; 12, 13, 14 – условные окружности касания реагентов 9, 10, 11; 15 – газовые сопла; 16 – мазутные форсунки; $\overline{H} = H/H_т$ – текущая и полная высота топки, м

При нагрузках Дпп ≥ 135 т/ч начинают шлаковаться ширмы. Для организации нормальной работы котлов требуется более радикальное вмешательство в конструктивное оформление зоны активного горения топок с уменьшением существующих значений тепловых напряжений [2, 3]. Но, если величина показателя $q_{лг}$ может быть уменьшена путем увеличения межярусного расстояния с вынесением пылепроводов из существующих горелочных блоков (рис. 1, *г*), то приблизиться к безопасному нормативному значению $q^н_F$ при фиксированных размерах топки согласно «Норм» можно за счет снижения тепловой и паровой нагрузок на ~ 15 % (Дпп ≈ 0,85 $Д^н$пп ≈ ≈ 136 т/ч) [2, 3].

Рекомендуемая для котлов БКЗ-160 схема размещения многофункциональных горелок представлена на рис. 1 [4–6]. На котлах БКЗ-220 второй очереди ТЭЦ г. Бишкек частично учтены проектные недостатки котлов БКЗ-160. В топках с двухъярусной встречной компоновкой вихревых горелок, размещенных на боковых стенах, величина теплового напряжения лучистой поверхности экранов в зоне активного горения $q_{лг} \approx 0{,}94$ МВт/м^2 соответствует нормируемому показателю $q^{н\ проект}_{лг} \le 1{,}0$ МВт/м^2 для проектного каменного угля и близко $q^{н}_{лг} \le 0{,}9$ МВт/м^2 для бурого угля, рис. 2 [2, 3, 7].

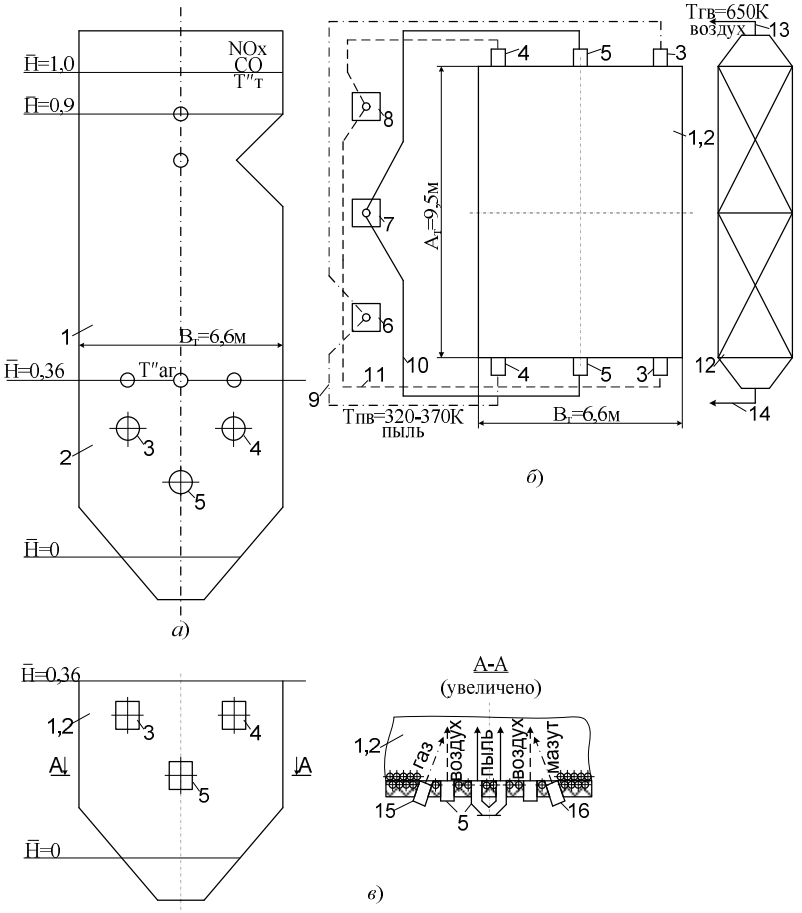


Рис. 2. Схема топки котла БКЗ-220: *а,б* – продольный и поперечный разрезы топки с существующими пылепроводами; *в* – вариантная схема компоновки многофункциональных горелок на боковых стенах топки; 1 – топка; 2 – зона активного горения; 3, 4 – горелки верхнего ярусов; 5 – горелки нижнего яруса; 6, 7, 8 – мельницы; 9, 10, 11 – пылепроводы от мельниц 6, 7, 8 к горелкам 3, 4, 5; 12 – воздухоподогреватель; 13, 14 – воздуховоды к горелкам 3, 4, 5; 15 – газовые сопла; 16 – мазутные форсунки; $\overline{H} = H/H_т$ – текущая и полная высота топки, м

Завод-изготовитель котлов БКЗ-160 и БКЗ-220 способен квалифицированно выполнить проектную документацию, необходимые разводки экранных труб и элементы многофункциональных горелок. Возникающие вслед за этим вопросы повышения экономичности сжигания топлива на-

прямую связаны с состоянием размольного оборудования, воздухоподогревателей. Особенно удручающе выглядят среднеходные мельницы котлов БКЗ-160, где в провал и затем в систему шлакозолоудаления уходит до 5,0 % и более всего топливного потока. Высока и степень износа воздухоподогревателей, что вызывает значительную утечку воздуха в поток продуктов сгорания и прирост потерь с уходящими газами Δq_2. С учетом этих обстоятельств КПД котлов брутто едва достигает 83–85 % против проектных 89–90 %.

Выводы

1. Обозначенные преимущества ВУС нового поколения позволяют говорить о целесообразности их подтверждения на одном из котлов БКЗ-160 с пусковым комплексом, включающим демонстрационную систему приготовления небольшой производительности, по результатам его испытаний принять направление модернизации с традиционной пылеугольной, рис.1*г*, или суспензионной технологией сжигания.

2. На котлах БКЗ-220 традиционную технологию пылесжигания на ближайшее десятилетие целесообразно сохранить, реконструировав горелки под разнородное твердое топливо и природный газ, в частности, по рис. 1, *г*; 2, *в*.

Библиографический список

1. Перевод котла БКЗ-160 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1993. – № 3. – С. 25–29.

2. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – Изд. 3-е. перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.

3. Митор, В.В. Проектирование топок с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания // В.В. Митор, Ю.Л. Маршак. – Л.: ВТИ – НПО ЦКТИ, 1981. – Вып. 42. – 118 с.

4. Osintsev, K.V. Changeover to low-temperature combustion of fuel in the boilers at cogeneration stations in Bishkek / K.V. Osintsev // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2012. – Vol. 59, no. 8. – P. 598–603.

5. Shifting the equipment of thermal power stations for firing different kinds of fuels in flames using the technology of distributed admission of reagents into the furnace / K.V. Osintsev, V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, and E.V. Toropov // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2008. – Vol. 55, no. 4. – P. 355.

6. Osintsev, K.V. Low-temperature combustion technology / K.V. Osintsev // ISRN Mechanical Engineering. – 2012.

7. Перевод котла БКЗ-220 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1991. – № 11. – С. 17–22.

УДК 621.181.7

АНАЛИЗ РЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Т.Б. Жиргалова, В.И. Зубеня

Рассмотрены вопросы оптимизации реальных циклов ТЭЦ.
Ключевые слова: эффективный кпд, ТЭЦ, экономия топлива.

Разработка новых циклов и реализующих их тепловых схем играет решающую роль не только в достижении высокого к.п.д., но и в снижении размеров капитальных вложений. В некоторых случаях модификация цикла приводит к удорожанию установки, но достигаемая экономия топлива перекрывает допустимый перерасход металла.

Для повышения эффективности реальной теплоэнергетической установки необходимо найти оптимальный в заданных условиях цикл (теоретический, образцовый), реальное осуществление которого обеспечит достижение максимума эффективного к.п.д. установки. Внешняя необратимость, обусловленная реальными процессами теплообмена, допускается. Эффективность реального цикла определяется его конфигурацией.

Определим показатели теплофикационного цикла, от которых зависит его эффективность. Выбираемый теоретический цикл ТЭЦ можно считать наилучшим, если суммарная экономия топлива от теплофикации в системе будет наибольшей. При этом обязательно выполнение условия, что электрические и тепловые потребители получат во всех случаях то же самое количество и качество каждого вида энергии. Экономия теплоты топлива в системе будет равна:

$$\triangle Q_{эк} = (B \cdot Q_н^р)_{разд} - (B \cdot Q_н^р)_{ТЭЦ}. \quad (1)$$

При раздельной схеме энергоснабжения суммарный расход теплоты топлива в энергосистеме составит:

$$(B \cdot Q_н^р)_{разд} = \frac{Э_{потр}}{\eta_{эс} \cdot \eta_{кэс}} + \frac{Q_{потр}}{\eta_{тс} \cdot \eta_{рк}}, \quad (2)$$

где $\eta_{эс}$ – к.п.д. электрических сетей; $\eta_{кэс}$ – электрический к.п.д. нетто конденсационной электростанции; $\eta_{рк}$ – к.п.д. нетто районной котельной; $\eta_{тс}$ – к.п.д. тепловых сетей.

При комбинированной схеме энергоснабжения расход теплоты топлива составит:

$$(B \cdot Q_н^р)_{ТЭЦ} = \frac{D_п \cdot q_l}{\eta_{пг}}, \quad (3)$$

где $\eta_{пг}$ – к.п.д. парогенераторов ТЭЦ; $D_п$ – суммарный расход пара, выра-

ботанный парогенераторами ТЭЦ; q_1 – теплота подводимая в парогенераторе одному килограмму пара.

В общем случае расход пара $D_п$ можно представить как сумму расхода пара $D_к$, вырабатывающего электроэнергию по конденсационному циклу и величины $D_т$, соответствующей расходу отборного пара на теплоснабжение.

$$(B \cdot Q_н^р)_{ТЭЦ} = \frac{q_1}{\eta_{пг}} \left(\frac{Э_{потр} + \Delta Э_{сн} \cdot \eta_{эс}}{l_к \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{мг}} - \frac{Q_{потр} \cdot l_т}{l_к \cdot \eta_{тс} \cdot q_т} + \frac{Q_{потр}}{\eta_{тс} \cdot q_т} \right), \quad (4)$$

где $q_т$ – теплота, отдаваемая в тепловую сеть одним килограммом острого пара теплофикационного потока; $l_т$ – приведенная выработка энергии одним кг пара, равная действительной работе цикла теплофикационного потока; $l_к$ – действительная работа цикла конденсационного потока.

Экономия теплоты топлива в системе становится:

$$\Delta Q_{эк} = Э_{потр} \left(\frac{1}{\eta_{кэс} \cdot \eta_{эс}} - \frac{q_1}{l_к \cdot \eta_{эс} \cdot \eta_{мг} \cdot \eta_{пг} \cdot \eta_{сн}} \right) +$$

$$+ Q_{потр} \left(\frac{1}{\eta_{тс} \cdot \eta_{рк}} - \frac{q_1}{\eta_{пг} \cdot \eta_{тс} \cdot q_т} \cdot \left(1 - \frac{l_т}{l_к} \right) \right), \quad (5)$$

где $\eta_{сн} = Э_{потр} / (Э_{потр} + \Delta Э_{сн} \cdot \eta_{сн})$ – коэффициент расхода электроэнергии на собственные нужды ТЭЦ.

Из формулы (5) следует, что при заданных показателях раздельного энергоснабжения *(*$\eta_{кэс}$, $\eta_{рк}$, а также $Э_{потр}$ и $Q_{потр}$) экономия топлива в системе будет определяться только показателями ТЭЦ и потерями в сетях ($\eta_{эс}$, $\eta_{тс}$). При этом часть показателей ТЭЦ практически не зависит от выбранного цикла ТЭЦ (как, например $\eta_{пг}$, $\eta_{мг}$, $\eta_{сн}$).

Решающее значение в достижении наибольшей экономии топлива от теплофикации имеют два показателя, характеризующие выбранный цикл ТЭЦ: отношение $\eta_i^к = l_к / q_1$, равное абсолютному внутреннему к.п.д. цикла конденсационного потока и отношение $Y = l_т / q_т$, называемое удельной выработкой электроэнергии на тепловом потреблении. Для установок с противодавлением, где конденсационный поток отсутствует, главным показателем эффективности их циклов будет величина Y.

Поэтому, наибольшая экономия топлива в энергосистеме от теплофикации достигается при наибольшем значении удельной выработки электроэнергии на базе отпускаемой потребителям теплоты. Это соответствует одновременному достижению максимума термического к.п.д. $\eta_t^к$ конденсационной части цикла и максимуму термического к.п. д. теплофикационной части цикла.

Условия построения образцового цикла теплофикационной установки складываются из необходимости подвода теплоты при температуре, близкой к T_1^{max}, отвода теплоты – при T_2^{min} и сжатие рабочего тела только в его жидкой фазе, то есть достижение максимального внутреннего к.п.д. цикла.

На рис. 1 совмещены два цикла: 12к3к4 – конденсационной установки и 12т3т4 – теплофикационной установки, с обратимым регенеративным подогревом питательной воды до температуры точки 4, одинаковой в обоих циклах.

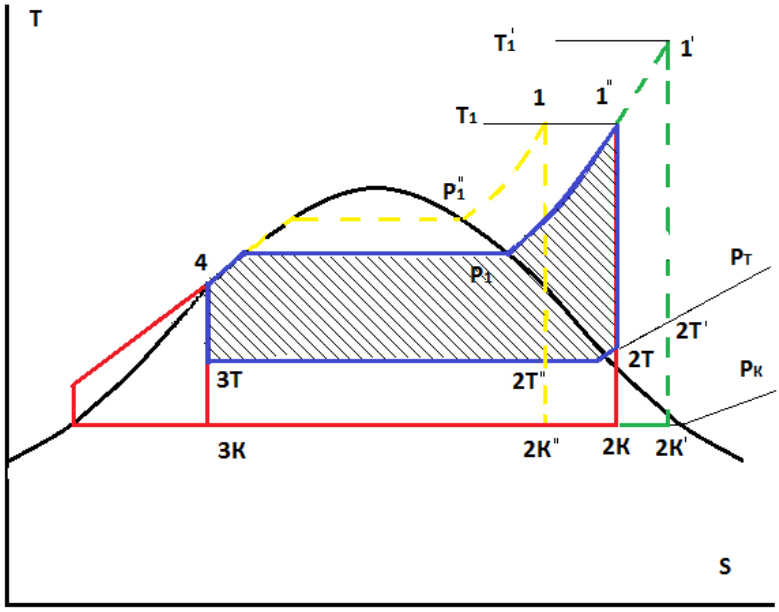


Рис. 1. Влияние повышения начальных параметров
на теплофикационный и конденсационный циклы

Если, не меняя начального давления p_1, поднять начальную температуру до $T'_1 = T_1 + \Delta T$, то отработавший пар конденсационной установки станет более сухим ($X'_{2к} > X_{2к}$), а отработавший пар теплофикационного цикла станет более перегретым ($T'_{2т} > T_{2т}$). Это приводит к тому, что потери от влажности в конденсационном цикле уменьшаются, а потери, вызванные перегревом отработанного пара теплофикационного цикла, увеличиваются. Одновременно, по причине подъема изобары $p_т$ на участке 2т2'т относительный прирост термического к.п.д. теплофикационного цикла будет меньше, чем конденсационного. По этим причинам прирост η_i теплофикационного цикла от повышения начальной температуры будет меньше, чем конденсационного.

Совершенно противоположный эффект получается при повышении начального давления от p_1 до $P''_1 = P_1 + \Delta P$. Конечное состояние отработавшего пара теплофикационного цикла переместится в точку 2"т , с меньшей температурой перегрева, а конденсационного – в точку 2"к, с большей влажностью. Относительный к.п.д. процесса расширения теплофикационного цикла возрастает, а конденсационного ухудшится.

В связи с этим в теплофикационных циклах более выгодно повышать давление, а в конденсационных – температуру, образцовые циклы теплофикационных паротурбинных установок должны иметь более высокое начальное давление и более низкую начальную температуру пара.

Второй особенностью циклов теплофикационных установок является меньшая эффективность промежуточного перегрева пара. Если вводить промежуточный перегрев пара при заданных начальных параметрах цикла, то при одинаковых начальных условиях промперегрев в конденсационном цикле даст большую экономию топлива, чем в теплофикационном цикле, а при высоких противодавлениях становится отрицательной.

Рассмотрим для примера регенеративный теплофикационный цикл 12т3т4 и соответствующий ему конденсационный цикл 1234 – рис. 2. При введении промперегрева пара по изобаре $p_{пп}$ (процесс XY) работа теплофикационного цикла увеличится на площадь XY 2’т 2т, а конденсационного на – XY2’2 .

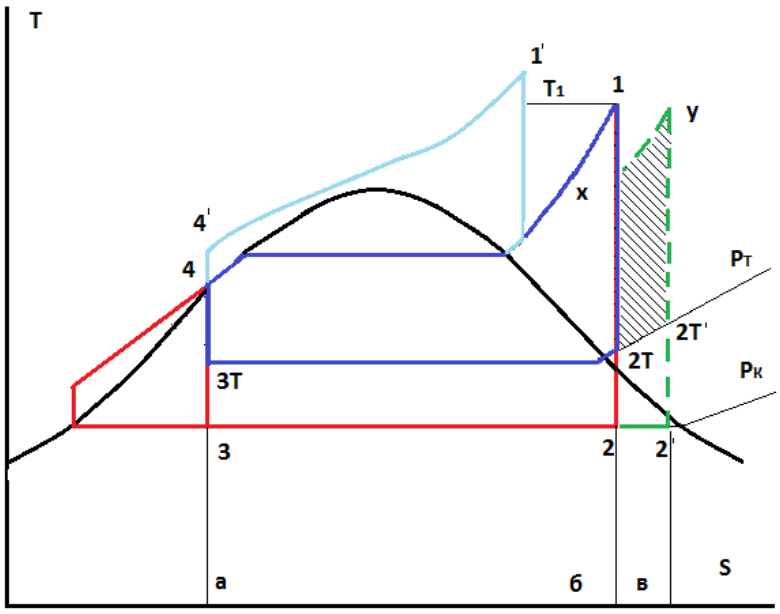


Рис. 2. Влияние введения промежуточного перегрева пара
на теплофикационные и конденсационные циклы

Из рис. 2 видно, дополнительный конденсационный цикл имеет более высокую температуру, чем основной цикл (1234), а конечная влажность пара более низкую. В результате этого введение промперегрева в конденсационном цикле значительно повышает его внутренний к.п.д. Удельная выработка электроэнергии в дополнительном цикле XY2’т2т оказывается тем меньше, чем выше противодавление $p_т$ и чем выше температура в точке 2т. При высоких противодавлениях удельная выработка дополнительного цикла оказывается меньшей, чем основного, поэтому такое вве-

дение промперегрева в теплофикационном цикле приводит к перерасходу топлива.

При введении промперегрева пара с одновременным повышением начального давления и сохранением заданного состояния отбираемого пара (точки 2т) удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении будет всегда возрастать. Этот способ промперегрева представляет введение надстройки дополнительного цикла (пл. I'X'4'4, рис. 2), величина которого будет совершенно одинаковой, как для конденсационной, так и для теплофикационной установок. При этом отдача тепла одним килограммом работающего в турбине пара $q_т$ не изменяется, величина удельной выработкой электроэнергии на тепловом потреблении будет всегда возрастать независимо от величины противодавления. Следовательно, введение промперегрева в теплофикационном цикле путем его надстройки будет всегда увеличивать экономию топлива на ТЭЦ.

Библиографический список

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учеб. для вузов по направлению 140100 «Теплоэнергетика» / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

УДК 669.053.2:536.2

ДИНАМИКА МАССООБМЕНА В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Е.В. Торопов

Предложен метод оценки динамики изменения концентрационных полей в нагреваемом материале, способствующий решению проблемы изменения масштаба и производительности новых пирометаллургических агрегатов.

Ключевые слова. Нагрев, металлизация, массоперенос, фактор кинетики, диффузия.

При разработке новых пирометаллургических технологий, например, при разработке альтернативных методов получения полупродуктов из рудного материала возникают проблемы изменения масштабов установок (Scale-up Problem – SP) и достижения проектной производительности промышленных агрегатов (Ramp-up Problem – RP). Относительно молодая подотрасль, названная металлургией железа, интенсивно развивается: в 2010 году только по основным технологиям MIDREX и HYL получено более 70 млн т металлизованного продукта. В РФ на заводе в Старом Осколе намечено увеличить производство с 3,4 до 9,4 млн т/год к 2020 году. В настоящей работе разрабатывается метод оценки динамики процессов массообмена, предлагаются показатели и методы их использования на практике, которые должны способствовать решению проблем SP и RP.

При решении вопроса о переносе основных характеристик экспериментальных и лабораторных установок на технологию промышленного масштаба вначале необходимо произвести декомпозицию проектируемого технологического процесса на структурные составляющие, где основными показателями являются время протекания тепловых и физико-химических процессов и лимитирующие эти процессы сопротивления. При этом выделяются звенья последовательного, параллельного и смешанного соединения; время действия каждого индивидуального процесса является следствием интенсивности процесса переноса субстанций, причем результирующий перенос определяется перемножением потенциала переноса и коэффициента интенсивности процесса.

Влияние на поток субстанции оказывают в равной степени и потенциал и коэффициент интенсивности, но относятся они к различным по способам и природе воздействиям – потенциал является, как правило, экстенсивным фактором, а коэффициент – интенсивным. Поэтому затраты на управление этими факторами различаются в техническом и финансовом планах. Необходимо также отметить, что самопроизвольные процессы протекают с возрастанием энтропии, поэтому поток субстанции снижает потенциал.

Для обобщения этих характеристик и их анализа предлагается применять правила Кирхгофа для соединения в единую схему всех индивидуальных по роду потоков субстанций сопротивлений – термических, диффузионных, кинетических, аэромеханических и т. д. Такая схема позволяет определить роль каждого элемента системы, определить узкие места в технологии и тренд показателей каждого элемента схемы при изменении масштабов, мощности, размеров и т. д.

Для решения SP и RP проблем предлагается обеспечить адекватность процессов переноса теплоты и массы в промышленном агрегате достигнутой эффективности этих процессов в экспериментальной установке; каждый процесс при этом распадается на внешнюю и внутреннюю задачи. Адекватность в данном случае означает соответствие основных показателей производственной работы агрегата проектным данным, рассчитанным по показателям экспериментальной установки.

По современным представлениям восстановление железа и получение из него различных сплавов являются сложными физико-химическими гетерогенными процессами; разложение общего процесса на первичные реакции не всегда позволяет определить основные факторы влияния на результирующий процесс. На практике при металлизации и восстановлении стремятся максимально ускорить физико-химический процесс и получить высокую степень использования восстановительного агента.

На направление и интенсивность протекания реакций в процессе восстановления существенное влияние оказывают физические факторы – температурный, связанный с подводом и отводом теплоты, и аэромеханический, связанный с подводом восстановителя и отводом газообразных продуктов восстановления. В целом скорость восстановления материала зависит как от скорости самой химической реакции, так и от скорости подвода газообразного восстановителя к поверхности реагирования, скорость результирующего процесса будет определяться (лимитироваться) скоростью самого медленного процесса.

Скорость собственно химической реакции в общем случае зависит от химической природы и концентрации реагирующих веществ, а также от физических факторов – давления и температуры. Если процесс протекает при атмосферном давлении, то главным фактором является температура; при относительно низких температурах (< 1000 °C) скорость химической реакции меньше скорости диффузии восстановителя к поверхности реагирования – это значит, что восстановитель имеется в избытке и условия его подвода существенного значения не имеют. Процесс восстановления в этом случае идет в кинетической области и с увеличением температуры скорость процесса растет пропорционально росту константы скорости реакции, экспоненциально зависящей от температуры в соответствии с законом Аррениуса.

После выравнивания скоростей двух процессов с повышением температуры реакция переходит в диффузионную область, где скорость процесса лимитируется подводом восстановителя к поверхности реагирования. Эти соображения относятся к крайним гранично-временным условиям, большинство же исследуемых процессов находятся в промежуточной зоне диффузионно-кинетических режимов. Задача поддержания на требуемом уровне основных технологических параметров восстановления при переходе от модели к производственному агрегату связана с численным определением фактора кинетики или диффузии. Фактор кинетики или диффузии, таким образом, предлагается применять в качестве критерия адаптации основных показателей при переходе от модели к производственному агрегату.

Фактор кинетики процесса металлизации или восстановления газообразным восстановителем в простом варианте без потери общности задачи можно рассмотреть на основе закона сохранения массы для установившегося гетерогенного процесса на поверхности реагирования, являющейся наружной поверхностью восстанавливаемого материала. При этом массовый поток восстановителя к поверхности за счет диффузии G_d, кг/с, равен количеству восстановителя, израсходованному на процесс восстановления G_r, кг/с. Таким образом, скорость восстановления, определенная по расходу газообразного восстановителя

$$G_r = kC_s = \alpha_d \left(C - C_s \right), \tag{1}$$

откуда, после исключения C_s,

$$G_r = C \Big/ \left(1/\alpha_d + 1/k \right); \tag{2}$$

для определения факторов кинетики и диффузии процесса восстановления по расходу газообразного восстановителя нужно отнести сопротивления кинетическим $1/k$ и диффузионным $1/\alpha_d$ процессам к общему сопротивлению

$$\omega_k = \frac{1/k}{\left(1/k + 1/\alpha_d \right)}; \tag{3}$$

$$\omega_d = \frac{1/\alpha_d}{\left(1/k + 1/\alpha_d \right)}; \tag{4}$$

$$\omega_k + \omega_d = 1. \tag{5}$$

Наличие потока восстановителя и реакции внутри пористой структуры материала несколько видоизменяют эти соотношения – этот поток зависит как от проницаемости материала, так и от интенсивности реагирования внутри него; также этот поток определяется значениями кинетических констант и размером внутренней реакционной поверхности в единице объема f_i, м^2/м^3, и следовательно, связан со структурными свойствами материала.

Характер и величина внутреннего диффузионного потока существенно отличаются от этих же показателей для диффузионного потока в свободном газовом объеме и в значительной степени зависят от кинетических показателей – при интенсивной реакции наблюдается интенсивный внутренний диффузионный поток, при низких кинетических константах внутренний поток невелик. Это позволяет отнести сопротивление при внутреннем реагировании к кинетическим сопротивлениям при реагировании на поверхности и вместо k в формулах (1)–(4) ввести $\beta = (F_s + f_i V)/F_s$, где $F_s = 4\pi r_0^2$, м^2, наружная поверхность сферической частицы материала радиусом r_0, м; $V = 4\pi r_0^3/3$, м^3, объем частицы; f_i – внутренняя поверхность реагирования единицы объема пористой частицы, м^2/м^3. Таким образом, при учете внутреннего реагирования с заменой кинетического коэффициента k на коэффициент реакционного газообмена β формула (5) сохраняет свой вид, а формулы (3)–(4) преобразуются с заменой k на β.

При переходе от экспериментальной установки к производственному агрегату или при другом изменении масштаба пирометаллургического агрегата, в котором реализуется восстановительный процесс необходимо сохранить численное соотношение между ω_k и ω_d. Смещение отношения ω_k/ω_d от полученного на экспериментальной установке либо в область усиления кинетических факторов, либо в область преобладания диффузионных факторов требует усиления того или иного управляющего воздействия: температуры процесса, скорости перемещения потока восстановительного газа, размера частиц материала и его теплофизических свойств и т. д., в соответствии с (5)–(7). По-видимому, эта схема больше подходит к технологиям, основанным на восстановлении композитных окатышей в кольцевых печах с движущимся подом (Fastmet, Redmet, Inmetco, ITmk3), а также в процессах металлизации Tecnored [1].

Рассмотренным выше способом можно учесть влияние и других факторов по их вкладу в диффузионное или кинетическое сопротивление, например, появление и поведение шлака, изменение состава восстановительной атмосферы и т. д.

Библиографический список

1. Ярошенко, Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.

УДК 669.053.2:536.2

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Е.В. Торопов

Предложен метод оценки динамики изменения температурных полей в нагреваемом материале, способствующий решению проблемы изменения масштаба и производительности новых пирометаллургических агрегатов.

Ключевые слова: нагрев, металлизация, теплоперенос, температурный фактор.

Все разрабатываемые альтернативные пирометаллургические технологии связаны с тепловой обработкой расплавляемого или восстанавливаемого сырья, поэтому эффективность этих технологий как в стационарном режиме, так и в режиме увеличения производительности или при масштабном преобразовании технологий, связана с достижением требуемых температур к контрольному времени процесса. Достигнуть согласования поля температур в нагреваемом материале с условиями теплопереноса в агрегате можно только при условии соответствия гранично-временных условий теплопереноса свойствам нагреваемого материала [1].

Адекватность процессов переноса теплоты при изменении масштаба установки или при изменении временного фактора процесса можно обеспечить условием $\omega_t = \text{idem}$, где $\omega_t = \partial^2\Theta/\partial\text{Bi}\cdot\partial\text{Fo}$, с использованием классической схемы решения дифференциального уравнения теплопроводности для тел канонической формы при соответствующих краевых (граничных и начальных) условиях. Например, при граничных условиях 3-го рода и начальной температуре θ_0 при $\text{Fo} \geq \text{Fo}_{\text{кр}}$ для частицы материала сферической формы радиусом r_0 получаем

$$\omega_t = -\mu_1^2 \exp\left(-\mu_1^2 \text{Fo}\right)\left[\frac{\partial D_1}{\partial \text{Bi}}\frac{\sin\mu_1 R}{\mu_1 R} + \frac{D_1}{\mu_1}\frac{\partial \mu_1}{\partial \text{Bi}}\left(\cos\mu_1 R - \sin\mu_1 R\right)\right], \qquad (1)$$

здесь

$\text{Bi} = \alpha r_0 / \lambda_{\text{м}}$; $\text{Fo} = a\tau/r_0^2$; $\Theta = (t - t_{\text{ср}})/(t_0 - t_{\text{ср}}) = \theta/\theta_0$;

$R = r/r_0$; μ_1 – корень характеристического уравнения;

$D_1 - 2(\sin\mu_1 - \mu_1\cos\mu_1)/(\mu_1 - \sin\mu_1\cos\mu_1)$.

Знак «минус» в правой части (1) свидетельствует только о том, что с увеличением времени (числа Fo) избыточная температура в любой точке тела θ уменьшается. Найти аналитически производные D_1 и μ_1 по числу Био не удается из-за того, что характеристические уравнения для тел канонической формы трансцендентны – не решаются аналитически. Поэтому и всю задачу по определению ω_t необходимо решать численно, либо исполь-

зовать аппроксимации по графикам зависимости температуры от Bi, Fo, R, приведенным в справочной литературе, например в [2,3]. При $Fo < Fo_{кр}$ появляется сходящийся ряд значений ω_t, искомое значение определяется суммированием с заданной точностью.

Если подвергаемый металлизации рудный материал имеет форму цилиндра, то температурный фактор определяется по формуле

$$\omega_t = -\mu_1^2 \exp(-\mu_1^2 Fo)\left[\frac{\partial D_1}{\partial Bi} I_0(\mu_1 R) - \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} D_1 R I_1(\mu_1 R)\right], \quad (2)$$

где $D_1 = 2I_1(\mu_1)/\{\mu_1[I_0^2(\mu_1) + I_1^2(\mu_1)]\}$; $I_0(\mu_1)$, $I_0(\mu_1 R)$, $I_1(\mu_1)$, $I_1(\mu_1 R)$ – функции Бесселя первого рода нулевого (индекс «0») и первого (индекс «1») порядков соответствующих аргументов μ_1 и $\mu_1 R$. Числа подобия $Fo = a\tau/r_0^2$; $Bi = \alpha r_0/\lambda$; $R = r/r_0$; μ_1 – первый корень характеристического уравнения $I_0(\mu)/I_1(\mu) = \mu/Bi$.

Когда нагреваемый и подвергаемый металлизации материал представляется в виде пластины с двухсторонним нагревом с учетом роли подины, температурный фактор определяется по формуле

$$\omega_t = -\mu_1^2 \exp\left(-\mu^2{}_1 Fo\right)\left[\frac{\partial D_1}{\partial Bi} Cos\left(\mu_1 X\right) - \frac{\partial \mu_1}{\partial Bi} D_1 X Sin\left(\mu_1 X\right)\right], \quad (3)$$

В зависимости (3): $D_1 = 2\sin\mu_1/(\mu_1 + \sin\mu_1\cos\mu_1)$; $Fo = a\tau/\delta^2$; $Bi = \alpha\delta/\lambda$; $X = x/\delta$; δ – полутолщина пластины или слоя, м; x – текущая координата рассматриваемой точки, м; μ_1 – первый корень характеристического уравнения $\mathrm{ctg}\mu = \mu/Bi$, при $Fo \geq Fo_{кр} = 0{,}30$.

Представленные выше зависимости соответствуют классическому решению дифференциального уравнения теплопроводности методом разделения переменных, в соответствии с которым температура в любой точке материала в любой момент времени представляется произведением двух независимых друг от друга избыточных температур, одна из которых является функцией только времени, а другая – функцией только пространственных координат. В соответствии с этим положением при нахождении производных выделялись пространственные и временные зависимости в формулах (1)–(3), то есть их связь через константу разделения и решение характеристического уравнения не учитывалась, что можно осуществить при последующем уточнении.

Также полученные зависимости в полной мере соответствуют краевым условиям с начальным распределением температуры материала $\theta_0 = \mathrm{const}$ и постоянными во времени температуры среды в агрегате $t_{ср} = \mathrm{const}$ и коэффициентом теплоотдачи на поверхность материала $\alpha = \mathrm{const}$. То есть, при отличии краевых условий в процессе тепловой обработки материала в промышленном агрегате от условий, принятых в классическом решении, необходимо производить режимное согласование условий математического моделирования с фактическими показателями процесса тепловой обра-

ботки. Например, в работе [2] приводятся решения для ряда типичных изменений краевых условий.

В том случае, когда по условиям тепловой обработки ($Fo < Fo_{кр}$) требуется определять сумму сходящегося ряда, общий температурный фактор определяется суммированием частных значений.

Особенности теплообмена при нагреве непроницаемого слоя материала отличаются от специфики теплообмена фильтруемого и кипящего слоя; схема движения теплоносителей также накладывает свой отпечаток. Противоточная схема движения теплоносителя и материала имеет ряд преимуществ по сравнению с прямотоком, так как в большинстве практически важных случаев в противотоке достигается более значительная разность температур. Значит, тепловая мощность агрегата достигается с меньшим расходом топлива. При прямотоке предел использования тепла греющего теплоносителя определяется его температурой на выходе из расчетного участка, а при противотоке – его температурой на входе, то есть, при противоточной схеме можно в большей степени использовать энтальпию греющего теплоносителя. Поэтому противоток получил большее распространение в тех агрегатах, где его применению не препятствуют требования технологии или условия стойкости материалов и элементов оборудования.

Схемы движения теплоносителя и нагреваемого материала дают возможность идентифицировать перенос теплоты и температуру в выделенных участках или зонах агрегата, что относится к краевым условиям процесса, определение ω_t позволяет решить внутреннюю задачу теплопроводности в обрабатываемом материале. Если краевые условия для рассматриваемого случая отличаются от принятых при получении решений (1)–(3), то необходимо корректировать полученные решения с учетом измененных краевых условий в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [2].

В том случае, когда перенос теплоты существенен не только в направлении одной координатной оси, применяется теорема о перемножении решений; тогда определяются температурные факторы по каждому направлению. В этом случае решение принимается по совокупности значений температурных факторов; при этом можно определить лимитирующие звенья по минимальному значению температурного фактора.

В том случае, когда необходимо проконтролировать температуру физико-химических или фазовых превращений, в формулы (1)–(3) подставляются координаты конкретных поверхностей: $X = 1$ или $R = 1$ для наружной поверхности пластины, цилиндра или шара, $X = 0{,}5$ или $R = 0{,}5$ для средних по координате поверхностей.

Предложенный в настоящей работе метод оценки динамики изменения температурного поля легко трансформируется в метод оценки теплового

режима. Для этого необходимо определить температурный фактор для средней по объему температуры материала, которая позволяет определить количество теплоты, которую необходимо подвести к нагреваемому материалу для достижения требуемой температуры; отсюда через термический КПД агрегата легко определяется требуемая тепловая мощность агрегата.

Необходимо также при анализе реальных производственных режимов выделять технологические зоны процесса – зону сушки, нагрева, выдержки и охлаждения по их вкладу в динамику всего процесса. Большую роль также играют неоднородности и нестационарности потоков среды и материалов, при этом необходимо выделить лимитирующие звенья и для них в первую очередь определять температурный фактор ω_t.

Условие $\omega_t = \text{idem}$ соответствует пространственно-временному подобию температурно-тепловых полей в экспериментальной установке и в промышленном агрегате, но следует также иметь в виду, что массообменные и тепловые характеристики взаимосвязаны. После получения в результате декомпозиции задачи решений по определению показателей массообмена и ω_t необходимо произвести их согласование, например, методом последовательных приближений.

По совокупности предложенных решений можно отметить, что применение температурного фактора при изменении масштаба установки или при освоении производственной технологии позволяет определить тот участок в технологии, который является лимитирующим, то есть, ограничивает производительность агрегата.

Представленные здесь методы учета характеристик теплопереноса и массообмена должны служить дополнением к принципам увеличения масштаба промышленных пирометаллургических печей, следующим из теории подобия тепловых агрегатов [3].

Библиографический список

1. Ярошенко, Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Ю.Г. Ярошенко, Я.М.Гордон, И.Ю. Ходоровская. – Екатеринбург, 2012. – 668 с.

2. Лыков, А.Н. Теория теплопроводности / А.Н. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

3. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

УДК 66.045-022.53

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПОСРЕДСТВОМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

И.Д. Харисов, К.В. Осинцев

В докладе представлены нанотехнологические методы интенсификации теплообмена, а именно, рассмотрены преимущества применения наножидкости в качестве теплоносителя для теплообменного оборудования, оценена эффективность формирования нанорельефа на теплообменной поверхности, а также рассмотрены некоторые проблемы использования данных технологий.

Ключевые слова: теплообмен, наножидкость.

Введение

Одним из путей интенсификации теплообмена в последнее время является разработка и внедрение различных технологий, выполненных на наномасштабном уровне. Нанотехнология подразумевает умение работать с такими объектами и создавать из них более крупные структуры, обладающие принципиально новой молекулярной (точнее надмолекулярной) организацией. Они являются искусственными образованиями и характеризуются новыми физическими, химическими и биологическими свойствами [1, 2]. Рассмотрим наиболее эффективные нанотехнологические методы интенсификации теплообмена.

1. Наножидкость как теплоноситель

Наножидкость вызывает большой интерес своим огромным потенциалом для обеспечения расширенными эксплуатационными свойствами. В отношении теплопередачи, по сравнению с более обычным теплоносителем новый и доступный теплоноситель демонстрирует высокую теплопроводность [4].

Наножидкости представляют собой двухфазную систему, состоящую из несущей среды (жидкости или газа) и наночастиц [3].

Первые попытки экспериментального изучения переноса тепла в наножидкостях, предпринятые в работах [5–7], продемонстрировали, что теплопроводность суспензий ультрадисперсных оксидов алюминия, кремния и титана в воде при объемной концентрации порядка нескольких процентов превышает теплопроводность чистой жидкости на десятки процентов.

Экспериментальные данные показывают, что эффективная теплопроводность зависит от размера и материала наночастиц [6, 8, 9].

Установлено, что вязкость и теплопроводность наножидкости при фиксированном размере частиц и концентрации φ увеличивается с ростом их массы. Типичная зависимость безразмерного коэффициента теплопроводности λ/λ_0, где λ_0 – теплопроводность несущей жидкости, представлена на

рис. 1. Здесь каждая кривая и соответствующие метки на рисунке построены при постоянном радиусе, поэтому зависимость от массы может быть сведена к зависимости от плотности материала наночастиц ρ_p. От объемной доли наночастиц φ коэффициент теплопроводности зависит более сложным образом. При $\varphi \leq 1$ % он растет практически пропорционально увеличению объемной доли, однако, далее темп роста замедляется (рис. 2).

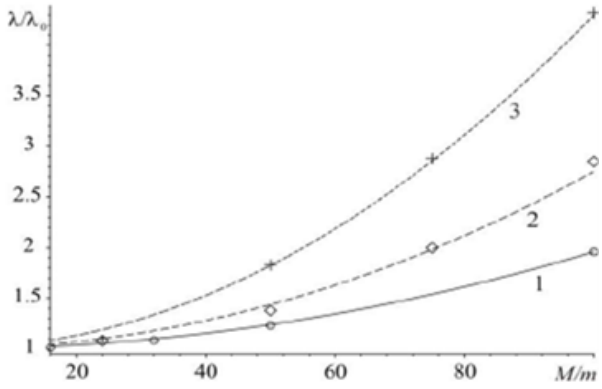


Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента теплопроводности от массы наночастиц при разных объемных концентрациях: φ = 0,12 % (метки o), φ = 0,24 % (метки ◇), φ = 0,48 % (метки +) [6–9]

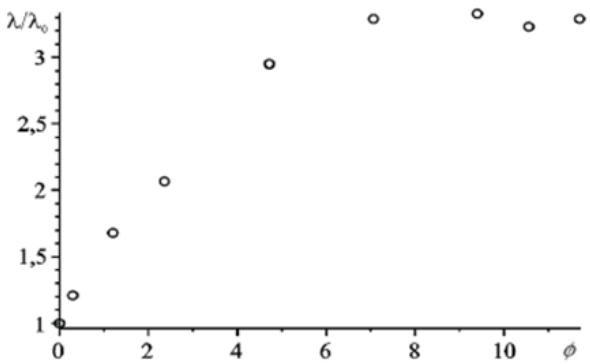


Рис. 2. Зависимости относительного коэффициента теплопроводности от объемной доли наночастиц [6, 8, 9]

В связи с изучением и развитием наножидкости Европейский Союз создал ультрасовременный нанотехнологичный проект «NanoHex», который направлен на развитие революционной системы охлаждения в различных промышленных применениях. Разработка тщательно спроектированной наножидкости [4].

Аспирант кафедры машиностроения в Токийском университете (University of Tokyo) С. Хариш говорит: «Мы решили производить наножидкость с использованием однослойных углеродных нанотрубок, так как они имеют высокую теплопроводность, а также способны образовывать сетки с углеродными нанотрубками, тем самым повышая теплопередачу».

Хариш говорит: «В нанотрубках мы использовали соли жёлчной кислоты для того, чтобы рассеять их тепло в жидкости. Такие рассеянные однослойные углеродные нанотрубки при очень низкой концентрации увеличивают теплопроводность обычного теплоносителя почти на 15 %».

2. Формирование нанорельефа для теплообменной поверхности

Целями нанесения нанорельефа на теплообменную поверхность являются:

– интенсификация теплообмена;

– уменьшение гидравлического сопротивления и отложений.

Способ формирования нанорельефа на теплообменной поверхности изделия (трубки) путем осуществления на ней кипения наножидкости заключается в том, что выбирают материал наночастиц с температурой плавления, равной 0,8–0,9 от температуры плавления изделия, получают при кипении наножидкости сплошной слой наночастиц на поверхности изделий с минимальным термическим сопротивлением, выдерживают изделие вместе со слоем наночастиц на нем в инертной атмосфере при температуре 0,7–0,8 от температуры плавления наночастиц в течение 30 мин [10]. Технический результат – получение на поверхности изделия слоя с минимальным термическим сопротивлением и скрепление указанного слоя с поверхностью изделия (рис. 3 и 4).

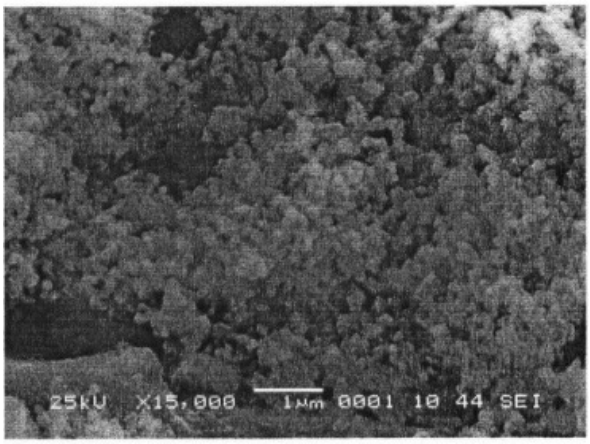


Рис. 3. Поверхность изделия после кипения на ней наножидкости

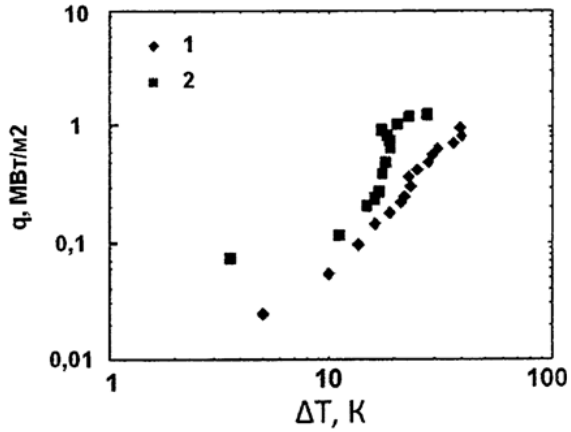


Рис. 4. Теплоотдача при кипении воды и наножидкости: 1 – вода, 2 – наножидкость, SiC = 0,01 %

3. Проблема использования наножидкостей

Вместе с тем систематическое использование наножидкостей станет возможным лишь в том случае, если можно будет заранее предсказывать их свойства. Это в свою очередь требует понимания механизмов переноса в наножидкостях. Несмотря на немалый накопленный фактический материал, как экспериментальный, так и теоретический, здесь все еще отсутствуют систематические данные, а результаты экспериментов часто противоречивы. В частности, пока не удается точно контролировать размеры и однородность распределения наночастиц, создавать монодисперсные наножидкости, добавление наночастиц может приводить к изменению реологии жидкости. Становится невозможным определить, как будут меняться свойства переноса наножидкостей при варьировании того или иного параметра системы: материала наночастиц, их формы, размеров, объемной концентрации и т. п. Отсутствует и физическое понимание наблюдаемых эффектов.

Библиографический список

1. Интенсификация тепло- и массообмена на макро, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев и др. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 533 с.

2. Старостин, В.В., Материалы и методы нанотехнологий: учеб. пособие / В.В. Старостин. – 3-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 431 с.: ил. – (Нанотехнологии).

3. Рудяк, В.Я. Моделирование коэффициентов переноса наножидкостей / В.Я. Рудяк, А.А. Белкин. – Новосибирск: ФГБОУ «НГАСУ (Сибстрин)», 2010. – 22 с.

4. Европейский Союз создал нанотехнологичный проект NanoHex. – http://newsland.com/news/detail/id/955773/

5. Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture // J. Thermophys. Heat Trans.

6. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersions of-Al2O3, SiO2, and TiO2 ultra-fine particles) / H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma // Netsu Bussei. – 1993. – Vol. 4. – P. 227–239.

7. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids / J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li et al. // Materials Research Society. Fall Meeting, Boston, 1998. – P. 3–11.

8. Kwak, K. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluids dispersed in ethylene glycol / K. Kwak, C. Kim // Korea-Australia Rheology J. – 2005. – 17(2). – P. 35–40.

9. Xuan, Y. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids / Y. Xuan, Q. Li, W. Hu // AIChE J. – 2003. – Vol. 49. – P. 1038–1043.

10. Способ формирования нанорельефа на теплообменных поверхностях изделий – http://www.findpatent.ru/patent/243/2433949.html.

УДК 621.33(470.55) + 625.4(470.55)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

В.И. Сафонов, Ю.В. Чистякова

Смоделировано движение электрического транспорта г. Челябинска. Сформированы требования, предъявляемые к накопителям, со стороны тяговой сети. Продемонстрирована возможность и эффективность использования накопителей на трамваях.

Ключевые слова: рекуперация энергии, электрический транспорт.

Повышение эффективности электрического городского транспорта является актуальной задачей. Разработка и эксплуатация вагонов с рекуперацией энергии в тяговую сеть позволила существенно уменьшить удельные затраты электроэнергии на перевозку пассажиров [1]. Однако, наличие в тяговой сети большого количества вагонов с рекуперацией энергии выявило и некоторые проблемы. В тяговой сети могут присутствовать источники энергии, но отсутствовать ее потребители. Это приводило к значительным перегрузкам по напряжению сети (до 850 В) и делало бесполезным рекуперацию энергии в тяговую сеть. В указанные промежутки времени энергию приходилось тратить в тормозных резисторах.

У возникшей проблемы существует несколько решений: организация движения транспорта по четкому графику, применение выпрямителей с рекуперацией энергии в систему электроснабжения и применение накопителей энергии на трамваях или тяговых подстанциях. Первый вариант был успешно опробован в г. Златоуст. Остальные варианты предполагают существенную модернизацию тяговых подстанций или электропривода трамваев.

В настоящее время на заводе в г. Усть-Катав ведется разработка электропривода с накопителем энергии на трамвае [1]. Требования к накопителю энергии как резервному источнику электроснабжения на случай аварии в контактной сети сформулированы: трамвай должен проехать около 1 км по плоскому участку со скоростью 5 км/ч. При тяговой способности электропривода 55 Вт·ч·км·т и массе трамвая 35 т это соответствует мощности источника около 15 кВт.

Накопитель энергии, при определенных характеристиках, может решить также проблемы в тяговой сети, возникшие в результате эксплуатации трамваев с рекуперацией энергии. Целью настоящей работы является формирование таких требований.

Моделирование движения трамваев было выполнено аналогично работе [2], в которой рассматривалось движение электропоездов. При модели-

ровании движения трамваев были приняты следующие допущения. Время остановки трамваев (в том числе на перекрестках), скорость движения трамваев на участках, мощность двигателя при разгоне и торможении были приняты случайными величинами с нормальным законом распределения. Математические ожидания и среднеквадратичные отклонения указанных величин были получены по данным о расписании движения трамваев в г. Челябинске [3] и данным о трамвае с рекуперацией энергии и его электроприводе.

В результате было смоделировано потребление энергии трамваем из тяговой сети. Электрическая энергия тратится на изменение кинетической и потенциальной энергии трамвая и потери на «трение». Под трением полагали все механические и электрические потери в трамвае и аппроксимировали их линейной функцией A + BV. Для оценки коэффициента B была использована тяговая способность электропривода.

На рис. 1 приведены графики изменения кинетической (обычный пунктир) и потенциальной (обычный штрих пунктир) энергии, а также потери на «трение» (обычная линия) и мощность трамвая (жирная линия) как потребителя энергии из тяговой сети. На рис. 1 дополнительно приведена зависимость скорости трамвая (в км/ч) (жирный пунктир). Рис. 1 построен при массе трамвая 35 т и движении трамвая под гору с уклоном 1 процент.

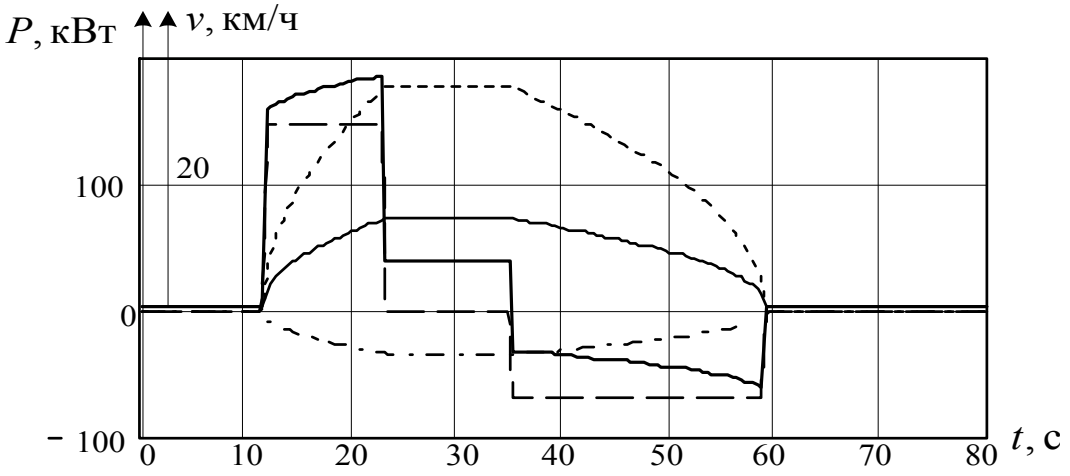


Рис. 1

На основании данных о расписании движения трамваев в г. Челябинске [3] было получено математическое ожидание и СКО плотности движения трамваев в обычном режиме (1,8 трамваев на км), в «час-пик» (2,2 трамваев на км) и в праздничные дни (1,1 трамваев на км). По данным о мощности тяговых подстанций (630 кВт) и схеме электроснабжения было получено математическое ожидание длины участка (1,6 км) тяговой сети, питаемой одним из трансформаторов двухтрансформаторной подстанции. Таким образом, на участке 1,6 км в режиме «час-пик», обычном и празд-

ничном режимах могут находиться от 3 до 5, от 2 до 3 и от 1 до 2 трамваев, движущихся в каждом направлении, соответственно.

На рис. 2 показана суммарная мощность (кВт) потребляемая (генерируемая) всеми трамваями на участке тяговой сети (1,6 км в гору с уклоном 1 процент и 1,6 км под гору), питаемом трансформатором подстанции. При построении графика потери в тяговой сети не учитывались, что оправданно для оценки доли (а не величины) избыточной энергии в системе.

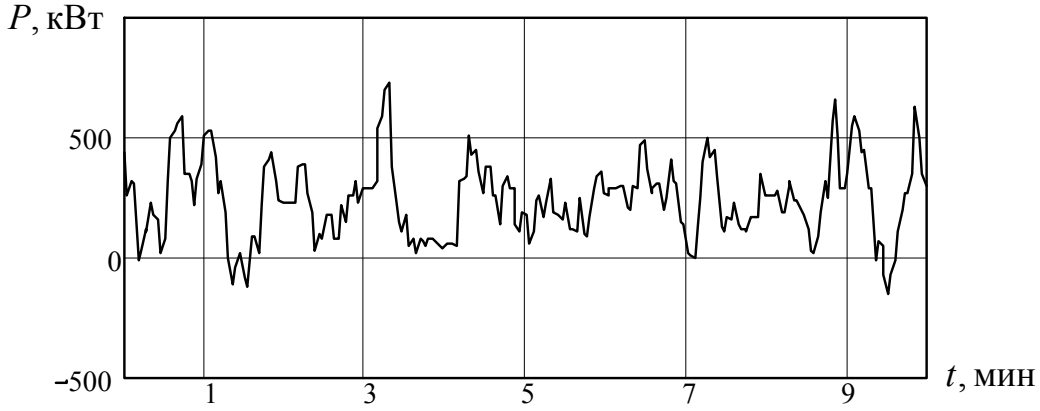


Рис. 2

Математически данный график можно рассматривать как одну из реализаций стационарного случайного процесса, обладающего эргодическим свойством [4]. Поэтому по данной реализации можно с большой степенью точности получить математическое ожидание и дисперсию потребления энергии одним из трансформаторов тяговой подстанции. Поскольку процесс движения трамваев и потребления ими энергии зависит от большого числа незначительных факторов, можно предположить, что случайная величина в любом сечении случайного процесса подчиняется нормальному закону распределения [4]. Для реализации, показанной на рис. 2, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение энергопотребления 250 и 150 кВт соответственно.

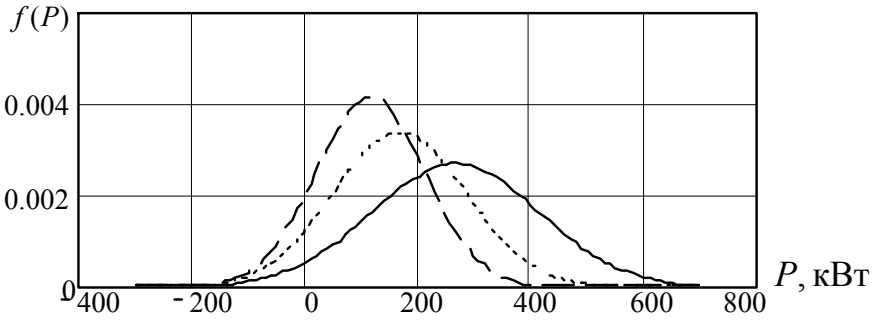


Рис. 3

На рис. 3 построены распределения плотности вероятности нагрузки трансформатора для «часа пик» (сплошная линия), для нормального режима (пунктир) и для праздничного режима (штрих пунктир). В «час пик» энергия, рекуперируемая двигателями, но не потребляемая в тяговой сети, составляет 5 % энергии системы. Для обычного и праздничного режима работы доля избыточной энергии составляет 7 и 9 % соответственно. Для меньшего количества трамваев на участке доля неиспользуемой энергии в тяговой сети выше, поскольку вероятность потребления рекуперированной в тяговую сеть энергии снижается. В среднем, доля неиспользуемой энергии при ее рекуперации в тяговую сеть составляет около 7 %.

Аналогичное моделирование было выполнено для переходного периода, когда эксплуатируются 50 % трамваев с рекуперацией энергии и 50 % трамваев без рекуперации энергии. В этих условиях доля избыточной энергии 4 % («чис-пик»), 5 % (обычный режим») и 6 % (праздничные режим). Средняя доля неиспользуемой энергии составляет около 5 %.

Полученные оценки можно применить и для других крупных городов, имеющих приблизительно совпадающий с Челябинском рельеф и интенсивность движения, и использовать для формирования требований, предъявляемых к накопителю на трамвае со стороны тяговой сети. Основными параметрами накопителя являются емкость накопителя и его зарядная мощность (зарядный ток).

Мгновенная зарядная мощность оказывает на обмен энергией между трамваем и тяговой сетью значительно большее значение, поскольку накопитель может не успеть принять рекуперируемую энергию, основная доля которой возникает при торможении (см. рис. 1). В тоже время возможность потратить энергию на увеличение кинетической энергии трамвая и потери на «трение» существует втечение большего промежутка времени.

Если зарядная мощность каждого из накопителей составляет 20 кВт, что соответствует требованиям надежности электропривода, то суммарная мощность накопителей трамваев на участке, питаемом одним трансформатором подстанции, составляет в «час пик» от 120 до 160 кВт, в обычном режиме от 80 до 120 кВт, в праздничном режиме от 40 до 80 кВт. В результате одновременное действие всех накопителей трамваев позволяет в час пик, в обычном и праздничном режимах аккумулировать соответственно 91, 85 и 61 % избыточной энергии. В среднем, накопители позволяют аккумулировать около 75 % избыточной энергии без реконструкции трансформаторных подстанций.

Сигналом к совместному действию накопителей трамваев может быть увеличение напряжения тяговой сети в месте нахождения трамвая, возникающее при рекуперации избыточной энергии в тяговую сеть. Использование накопленной энергии возможно при разгоне или движении трамвая до следующей остановки. Естественно, описанная стратегия требует соз-

дание более сложной системы управления электроприводом. При более детальной проработке данное решение может оказаться экономически менее целесообразным, чем установка одного накопителя на трансформаторной подстанции с максимальной мгновенной мощностью около 120 кВт.

Таким образом, проведенное моделирование показало принципиальную возможность и достаточную эффективность использования накопителей на трамваях для предотвращения перегрузок в тяговой сети и более эффективного использования электроэнергии.

Библиографический список

1. Сайт УКВЗ. – http// www.ukvz.ru

2. Кшиштошек, К. Имитационное моделирование движения тяговых электрических машин в заданной области электроснабжения / К. Кшиштошек, М. Хшан, Э. Шихта // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1.

3. Сайт Горэлектротранса г. Челябинска. – http:// www.cheltram.ru

4. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука – 1991 – 384 с.

УДК 621.311.1

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В С ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ

Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров

Аннотация: В статье рассматриваются особенности расчетов токов однофазного замыкая в электрической сети напряжением 380 В с учетом эффекта теплового спада и сопротивления дуги в месте замыкания. Описывается алгоритм расчета тока однофазного короткого замыкания.

Ключевые слова: воздушная линии напряжением 380 В, однофазные короткие замыкания, тепловой спад, сопротивление дуги.

По данным литературных источников [1–3] однофазные замыкания являются одним из частых видов повреждений. Для электрических сетей напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью и применением системы TN-C характерны однофазные короткие замыкания (ОКЗ) на нулевой рабочий провод и связанные с ним металлические конструкции. Согласно [4] время отключения защит в цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, не должно превышать 5 с.

Расчётам токов ОКЗ в электрических сетях напряжением 380 В посвящено много работ, среди которых выделим [5–10]. Рассмотрим наиболее распространенные методики расчета токов ОКЗ в электрических сетях напряжением 380 В.

Метод «петля фаза-нуль». Он относится к простым методам расчета токов ОКЗ и широко используется при проектировании и эксплуатации электрических сетей напряжением 380 В. В тоже время, данный метод является упрощенным, поскольку не учитывает такие факторы как эффект «теплового спада» токов короткого замыкания и сопротивление дуги в месте замыкания. Поэтому есть основание говорить о том, что это метод позволяет определять только ток однофазного металлического короткого замыкания [8–10]. Следовательно, метод «петля фаза-нуль» не может быть рекомендован к применению на стадии проектирования для определения параметров устройств релейной защиты и, в частности, коэффициента их чувствительности.

Метод симметричных составляющих [11, 12]. В этом методе для определения минимального значения тока ОКЗ учитывается эффект «теплового спада» и сопротивления дуги. Рассмотрим подробнее эти две особенности расчетов токов ОКЗ.

Эффект «теплового спада» токов короткого замыкания учитывается с помощью поправочного коэффициента K_θ в зависимости от тока короткого

замыкания для различных сечений проводов и времени срабатывания защиты – 0,2; 0,6; 1,0 и 1,5 с. Активное сопротивление линии при конкретных условиях определяется по выражению $R_{Л.\theta} = K_{\theta} \cdot R_{Л}$, где $R_{Л}$ – сопротивление линии при начальной температуре 20 °С.

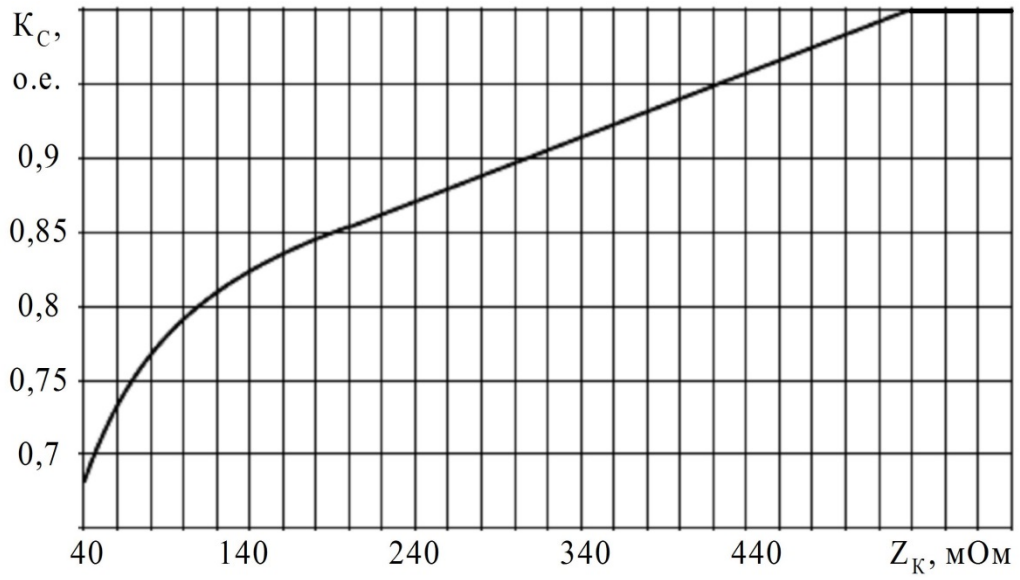
В ГОСТ 28249–93 [11] расчет сопротивления дуги предлагается учитывать с помощью поправочного коэффициента K_C, который предложен в работе [6]. В ней на основе статистической обработки большого числа экспериментов данных, полученных в процессе проведения опытов в реальных распределительных устройствах Омской ТЭЦ-4, Красноярской ГРЭС-2, Назаровской ГРЭС и ПС «Камала», представлено эмпирическое выражение для определения поправочного коэффициента K_C, учитывающего снижение тока за счет сопротивления дуги. Коэффициент K_C является функцией полного сопротивления короткозамкнутой цепи, меняющейся в относительном малом и недостаточном диапазоне – от 40 до 200 мОм.

Учитывая выше сказанное, предлагаемая в [11] методика расчета минимального тока ОКЗ с учетом эффекта «теплового спада» тока ОКЗ и сопротивления дуги в месте замыкания имеет ряд ограничений, не позволяющих в полной мере провести оценку минимального тока ОКЗ.

Авторами предлагаются дополнения к расчету минимального тока ОКЗ методом симметричных составляющих. Суть предлагаемых дополнений состоит в следующем:

1. Тепловой спад токов ОКЗ предлагается рассматривать для двух временных диапазонов отключения токов ОКЗ. При близких к трансформаторной подстанции повреждениях (до 50 м), где кратности токов ОКЗ по отношению к номинальным токам защитных аппаратов составляет 8–10 $I_{F.H}$ ($I_{QF.H}$) и их отключение не превышает 0,2–0,5 с. С учетом запаса время нагрева проводов на этом участке электрической сети принято $t_0 = 1{,}5$ с. При расстоянии более 50 м до места повреждения кратности токов ОКЗ уменьшаются, но время отключения защитных аппаратов не должно превышать $t_0 = 5$ с, которое и принято для расчета теплового спада токов ОКЗ на последующих участках ВЛ-0,38 кВ. Это дополнение позволит дифференцированно определять эффект теплового спада тока ОКЗ на разных участках электрической сети напряжением 380 В. Для определения увеличения активного сопротивления проводника в зависимости от величины тока ОКЗ и времени его протекания по проводнику использована формула, предложенная в [7].

2. Учет сопротивление дуги в месте замыкания осуществляется поправочным коэффициентом [13], который представляет собой эмпирическую зависимость от сопротивления цепи току ОКЗ $K_C = f(Z_K^{(1)})$ в диапазоне его изменения 40 до 200 мОм. Путем графической экстраполяции было получено изменение K_C до $Z_K^{(1)} = 580$ мОм. При большем значении $Z_K^{(1)}$ поправочный коэффициент K_C принят равным 1 (см. рисунок).



Зависимость поправочного коэффициента $К_С$
от сопротивления цепи короткого замыкания $Z_К$

Ниже рассмотрим алгоритм расчета минимального тока ОКЗ:

1. Определяем:

– ток металлического ОКЗ по длине воздушной линии $I^{(1)}_{К.М} = f(Z^{(1)}_К)$, используя принятые в [11, 12] исходные положения;

– поправочный коэффициент $К_С = f(Z^{(1)}_К)$, обусловленный наличием в цепочке сопротивления дуги;

– ток дугового ОКЗ $I^{(1)}_{К.Д} = f(Z^{(1)}_К, К_С)$.

2. Определяем увеличение активного сопротивления воздушной линии $R^{(1)}_{Л.\vartheta} = f(I^{(1)}_{К.Д}, t_0)$ в зависимости от воздействующего на него тока $I^{(1)}_{К.Д}$ и времени отключения t_0. При длине линии менее 50 м принимаем t_0 = 1,5 с, а при длине линии равной и более 50 м – t_0 = 5 с.

3. Определяем полное сопротивление цепи ОКЗ $Z^{(1)}_{К.\vartheta} = f(I^{(1)}_{К.Д}, R^{(1)}_{Л.\vartheta})$, поправочный коэффициент $К_{С.\vartheta} = f(I^{(1)}_{К.Д}, Z^{(1)}_{К.\vartheta})$ с учетом теплового спада.

4. Уточняем минимальный ток ОКЗ $I^{(1)}_{К.Д.\vartheta} = f(Z^{(1)}_{К.\vartheta}, К_{С.\vartheta})$ с учетом его теплового спада и наличия сопротивления дуги.

Расчет минимального тока ОКЗ в конкретной точке воздушной линии напряжением 380 В проводится в несколько итераций. Предлагаемые авторами дополнения в методику расчета минимального тока ОКЗ позволят точнее определять параметры токовых защит.

Библиографический список

1. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. для электротехн. и энергетич. вузов и факультетов / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

2. Blackburn, J.L. Protective Relaying. Principles and Applications / J. L. Blackburn, T.J. Domin. – 3rd ed. – CRC Press, 2006. – 638 p.

3. Дубов, А.Л. Методика расчёта режимов и комплексная защита воздушных линий напряжением до 1 кВ: автореф. дис. … канд. техн. наук / А.Л. Дубов. – Екатеринбург: УПИ, 1992. – 21 с.

4. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 750 с.

5. Спеваков, П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В / П.И. Спеваков. – М.: Энергия, 1971. – 86 с.

6. Шиша, М.А. Разработка методики учёта влияния электрической дуги на токи короткого замыкания в цепях собственных нужд напряжением до 1 кВ электрических станций и подстанций: автореф. дис. … канд. техн. наук / М.А. Шиша. – М.: МЭИ, 1995. – 20 с.

7. Егорушкин, И.О. Влияние теплового спада тока короткого замыкания на функционирование сельских электрических сетей напряжением 0,4 кВ: дис. … канд. техн. наук / И.О. Егорушкин. – Красноярск: КрасГАУ, 2008. – 334 с.

8. Беляев, А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ / А.В. Беляев. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 230 с.

9. Сравнение методов расчета однофазного КЗ в электроустановках до 1 кВ / А.В. Богдан, В.А. Богдан, В.В. Савиных, В.В. Соболь // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. –№ 11. – С. 30–31.

10. Белов, А.В. Практические методы расчета однофазного короткого замыкания в сетях напряжением до 1кВ / А.В. Белов, Ю.П. Ильин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 17–23.

11. ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 42 с.

12. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.

13. Шиша, М.А. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ / М.А. Шиша, В.М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2011. – № 72. – С. 38–41.

УДК 621.311.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров

В статье описываются возможные направления исследования на компьютерной модели электрической сети напряжением 380 В в программной среде Matlab.

Ключевые слова: воздушная линии напряжением 380 В, компьютерная модель, Matlab.

Исследование параметров электрической сети напряжением 380 В аналитически в различных её точках представляется достаточно трудоемким процессом. Объясняется это тем, что для различных режимов электрической сети необходимо записывать соответствующие уравнения состояния сети. С помощью программного комплекса Matlab можно создать компьютерную модель электрической сети и значительно качественнее и быстрее проводить анализ параметров сети в различных режимах ее работы.

На основе пакета Simulink нами построена компьютерная модель электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями, которая позволяет проводить исследования:

– изменения напряжения и его симметричных составляющих как по величине, так и по фазе на линии в различных точках сети при обрыве фазных и нулевого проводов;

– влияния различных факторов (сопротивление повторных заземлений нулевого провода, сопротивления дуги, величины нагрузки и т. д.) на величину тока однофазного короткого замыкания;

– влияния различных факторов на величину дифференциального тока в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью и применением системы TN-C.

Первое направление исследований проводится с целью анализа изменений напряжений и его симметричных составляющих при обрывах фазных или нулевого проводов. При этом учитывается влияние следующих факторов:

– несимметрия нагрузки электроприемников по фазам сети;

– схемы подключения трехфазных и однофазных электроприемников к сети – в «звезду», «треугольник», на фазное напряжение;

– величина сопротивления заземляющего устройства у потребителя;

– расстановка повторных заземлителей по длине воздушной линии.

Данные исследования позволят, во-первых, определить возможные диапазоны изменения различных напряжений как при нормальном режиме работы электрической сети, так и обрывах фазных и нулевого проводов, во-вторых, выбрать критерии, четко характеризующие разные режимы работы электрической сети, в-третьих, сформулировать требования к устройствам определения этих режимов.

Второе направление исследований позволит проанализировать влияние на величину однофазного тока короткого замыкания количества и величины сопротивления повторных заземлений, электрической нагрузки различного характера.

Эти исследования позволят уточнить требования к работе токовых защит электрической сети с воздушными линиями, в частности, построенных с использованием плавких предохранителей и автоматических выключателей.

Третье направление исследований проводится с целью анализа возможности применения защит, основанных на выявлении токов нулевой последовательности. Таковыми могут служить устройства защитного отключения и дифференциальные автоматические выключатели. Заметим, что в электрических сетях напряжением 380 В на величину дифференциального тока влияют:

– количество и величина сопротивления повторных заземлений нулевого провода;

– величина сопротивления заземляющего устройства у потребителя;

– количество отходящих воздушных линий от подстанции 6–10/0,4 кВ;

– степень несимметрии нагрузки;

– наличие распределенной нагрузки;

– величина сопротивления в месте замыкания при обрыве и падении на грунт фазного провода.

– удельного сопротивления грунта и т. д.

Это направление позволит определить возможные области применения дифференциальных защит электрической сети напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью и применением системы TN-C. При этом предоставляются широкие возможности по оценке влияния различных факторов на выбор уставок защит.

Результаты, полученные на компьютерной модели, зависят от того насколько корректно собрана модель и заданы параметры элементов. Так, например, авторами были промоделированы две реальные действующие электрические сети напряжением 380 В и в которых были проведены экспериментальные исследования в нормальном режиме работы при обрывах фазных проводов и однофазном замыкании на землю. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований отличаются не более, чем на 5–10 %.

УДК 621.314.632

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ДРОССЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В СХЕМУ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЕЙ

В.В. Прохоров

Рассмотрен один из вариантов улучшения энергетических показателей диодных выпрямителей с дроссельным управлением.

Ключевые слова: выпрямители; дроссели насыщения.

Такие энергоемкие отрасли как, например, электрометаллургия, электрохимия, электрифицированный городской, горнорудный и магистральный железнодорожный транспорт, а также ряд других производств потребляют электрическую энергию в виде выпрямленного постоянного тока. При этом во многих случаях выпрямительные агрегаты должны быть оснащены системами автоматического или ручного регулирования электрического режима. Например, в мощных электролизных установках бывает необходимо строго поддерживать постоянную величину тока. На железнодорожном транспорте требуется поддержание определенного уровня выходного напряжения. В ряде случаев необходимо регулировать ток или напряжение по определенной программе.

Ввиду нецелесообразности применения управляемых вентилей при высоких значениях преобразуемых мощностей одним из путей является использование диодных выпрямительных агрегатов с магнитным управлением при помощи дросселей насыщения [1–3]. Такой подход, как и любое фазовое управление, ухудшает коэффициент мощности преобразователя. В настоящем докладе кратко описывается один из путей ослабления этого явления.

За основу взят способ быстродействующего управления диодным выпрямительным агрегатом дросселями насыщения, рабочие обмотки которых шунтируются тиристорами [2, 3]. Суть состоит в следующем. В схему вводится дополнительный диодный мост, показанный на рис. 1 пунктиром, через который обмотки управления дросселей подключаются к шинам выпрямленного напряжения. За счет того, что обмотки управления имеют большее число витков, чем рабочие, дроссели на этапе своего выведения работают в качестве трансформаторов на-

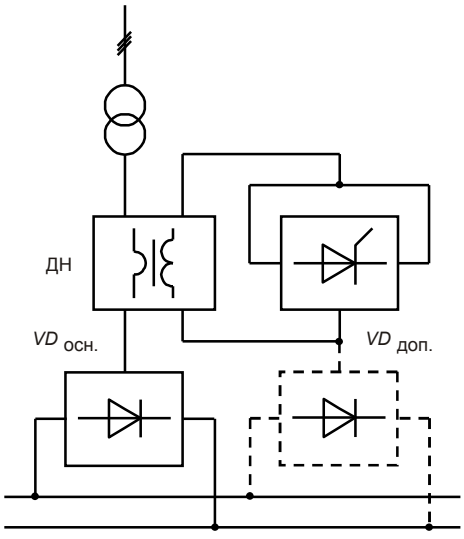


Рис. 1

пряжения с повышающим коэффициентом. Это приводит к тому, что напряжение на дополнительных вентилях становится положительным раньше, чем на соответствующих им вентилях основного моста, они открываются и процесс коммутации начинается через них. Иными словами, введение в схему дополнительного диодного моста позволяет процессу коммутации начаться не после насыщения дросселей, а раньше, что приводит к уменьшению угла сдвига первой гармоники фазного тока трансформатора (рис. 2) и, следовательно, к увеличению $\cos\varphi$ агрегата. При этом длительность процесса выведения дросселей, а значит и величина выпрямленного напряжения по-прежнему регулируется открыванием тиристоров в нужные моменты времени.

Помимо этого, рис. 2 иллюстрирует также заметное снижение пульсаций выпрямленного напряжения.

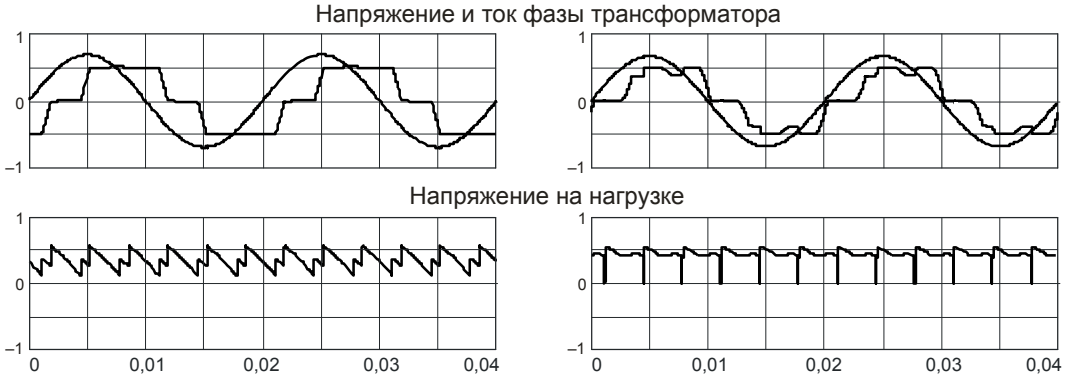


Рис. 2

Энергетические характеристики рассматриваемой схемы лучше, чем у аналогичной без дополнительного моста. На рис. 3 они показаны при одинаковом диапазоне регулирования выпрямленного напряжения, максимально возможном для схемы с дополнительным мостом. При увеличении угла управления зависимость $\cos\varphi$ от тока нагрузки в обычной схеме снижается, как показано слева, а при наличии дополнительных вентилей – сначала снижается, а затем начинает улучшаться. Стрелкой показано направление перемещения характеристики при увеличении угла управления, сплошной линией показаны характеристики для номинального значения тока I_d^*.

Рис. 4 иллюстрирует улучшение спектра тока трансформатора при использовании рассматриваемой схемы.

Еще один эффект от введения в схему дополнительных вентилей заключается в некотором увеличении жесткости внешней характеристики выпрямителя. При угле управления, равном нулю, характеристики совпа-

дают, а с увеличением угла управления жесткость внешней характеристики у рассматриваемой схемы увеличивается (рис. 5).

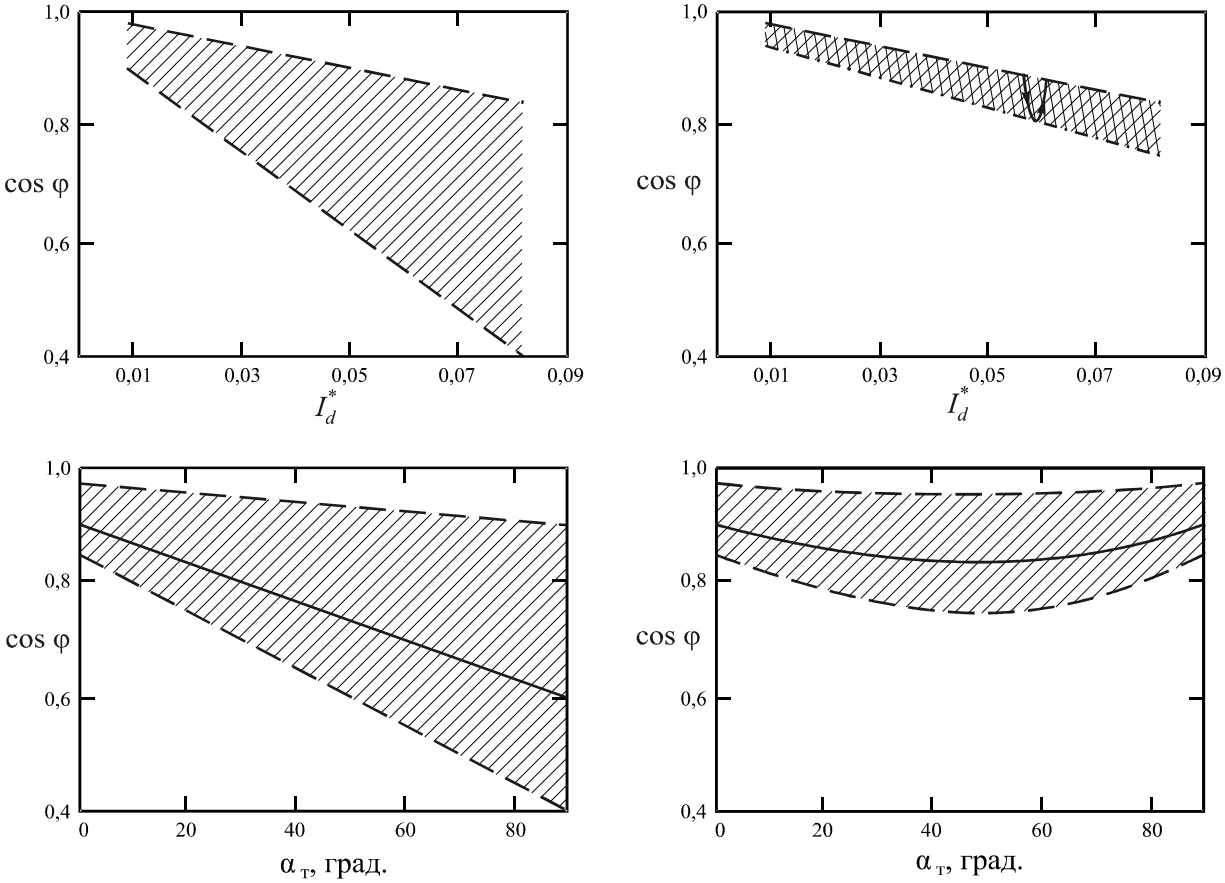


Рис. 3

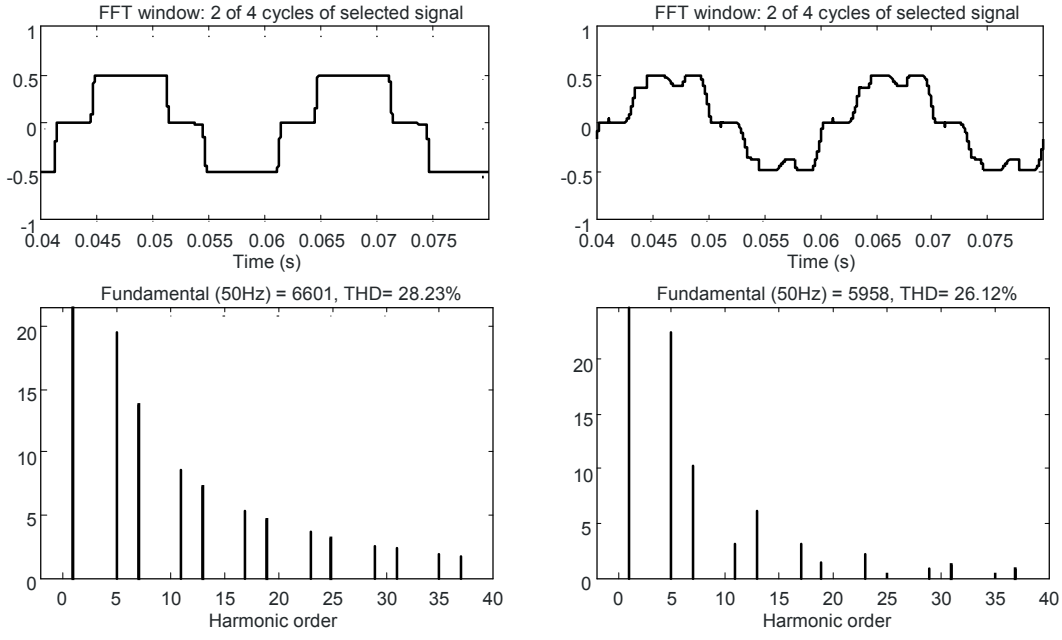


Рис. 4

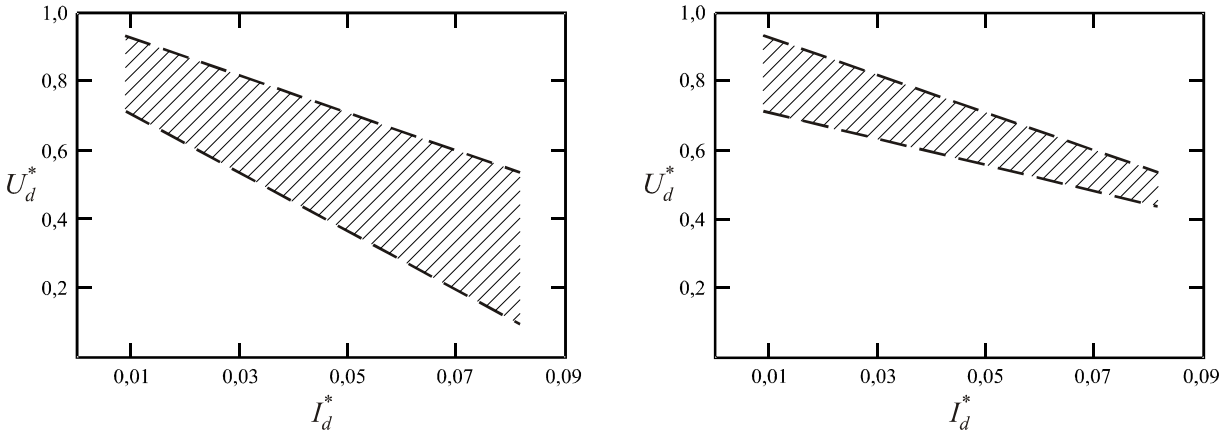


Рис. 5

Иными словами, введение в цепь управления дросселями насыщения дополнительного диодного моста позволяет, во-первых, улучшить cos φ агрегата, во-вторых, несколько уменьшить коэффициент гармоник фазного тока, в-третьих, снизить коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения и, наконец, увеличить жесткость внешней характеристики.

Разумеется, у данного способа есть и недостатки. Главный из них заключается в уменьшении глубины регулирования выпрямленного напряжения, что заметно на внешних характеристиках (рис. 5).

Библиографический список

1. Мосткова, Г.П. Сравнение схем включения дросселей насыщения при использовании их для управления трехфазным полупроводниковым выпрямителем / Г.П. Мосткова, Ф.И. Ковалев // Электромеханика. – 1962. – № 5.

2. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.

3. Хохлов, Ю.И. Способы дроссельного управления полупроводниковыми выпрямительными агрегатами / Ю.И. Хохлов, В.В. Прохоров // Промышленная энергетика. – 2000. – № 5. – С. 47–49.

УДК 621.3.01

КУРС ДЕДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ДЛЯ МАГИСТРОВ

М.И. Грамм

Рассмотрены основные положения курса электротехнической теории повышенного уровня, предназначенного для аспирантов и магистров электроэнергетических специализаций. Для отличия от стандартных курсов теоретических основ электротехники предлагаемая тактика обучения продвинутым методам электротехнических расчётов условно названа «дедуктивной электротехникой», что мотивировано и более общим характером математических методов с их плотной привязкой к математическим пакетам современного персонального компьютера.

Ключевые слова: основная задача анализа цепи, ортогональные преобразования, линейная алгебра, вычислительная математика.

В статье [1] было предложено реорганизовать существовавший в то время курс теоретической электротехники с учётом быстро внедрявшихся персональных компьютеров. Практика преподавания, однако, показала, что перенос центра внимания на мощные современные методы решения основной задачи анализа цепи уже в начале освоения электротехники ослабляет усвоение физики электротехнических явлений. Последовательное приспособление мощных вычислительных методов линейной алгебры в [2], а затем и упрочнение их статуса изданием [3] выявили определённую элитарность предложенного варианта электротехнической теории.

С другой стороны, цикл статей автора в журнале «Электричество» и в других периодических изданиях продемонстрировал простоту решения многих вычислительных задач предлагаемыми в подходе методами. Весьма просто раскрывались для реализации методы расчётов полей как с использованием тактики конечных элементов, так и конечно-разностных методов. Был разработан аппарат описаний эквивалентных по мощности преобразований цепей, был определён круг инвариантов для множества цепей и т. п. Направление должно было найти эффективное педагогическое применение ввиду очевидной пользы для инженерной практики.

И, когда в системе вузов РФ началось развитие двухуровневой организации образования, стало ясно, что повышенный характер «дедуктивной электротехники» способен найти своё место в обучении магистров и аспирантов. После разработки учебных планов и программ возникла необходимость обеспечения учебного процесса соответствующей литературой. Во исполнение этого замысла кафедра теоретических основ электротехни-

ки ЮУрГУ и запланировала на 2012/13 учебный год издание учебного пособия повышенного уровня для магистров и аспирантов.

Основные положения, составляющие основу предлагаемого пособия, выглядят следующим образом. Первая глава последовательно в соответствии с историческим порядком появления фундаментальных законов электротехники подводит читателя к формулировке в последнем параграфе главы уравнений Дж.К. Максвелла. Дело в том, что масштаб обобщения Максвеллом накопленных к моменту выхода его «Трактата» в 1873 году бесчисленных эмпирических наблюдений может быть понят полезным для дальнейшего обучения путём только через картину всех частностей, сложившихся в электрофизике в XIX веке. Догадка о существовании единого для всей пестроты устройств электромагнитного поля явилась главной заслугой Максвелла. Знакомству инженера с полезными частностями до понимания их обобщения уравнениями Максвелла и посвящена первая глава.

Во второй главе раскрывается для электротехнической теории один из важнейших приёмов всякой прикладной науки – введение общего и неизменного параметра, преобразования которого переводят анализ от одного объекта к другому. Такой параметр является инвариантом множества. Он полезен тогда, когда есть аналитический аппарат перехода от объекта к объекту множества. За такой инвариант взят квадратичный функционал F линейной цепи, представляющий собой в электротехническом смысле разницу между общей мощностью потерь P_R цепи и двойным значением генерируемой источниками $\mathbf{E}$ мощности P_E. Очевидно, при соблюдении баланса мощности в цепи эта разница равна общему потреблению в цепи. Функционал F является инвариантом для ортогональных преобразований $\mathbf{T} = \mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^{\mathrm{T}}$ матричного описания $\mathbf{R_0}$ исходной цепи в однородном базисе:

$$F = P_R - 2 \cdot P_E = \mathbf{T} \cdot \mathbf{R_0} \cdot \mathbf{T}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{I_0} - 2 \cdot \mathbf{E_0}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{T}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{I_0} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I} - 2 \cdot \mathbf{E}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{I},$$

где $\mathbf{R_0}$, $\mathbf{E_0}$, $\mathbf{I_0}$ – матрица описания исходной цепи в однородном базисе, источники исходной цепи, параметры состояния исходной цепи; $\mathbf{R}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{I}$ – те же параметры, но для любой другой цепи множества с той же мощностью потерь и мощностью источников, что и в цепи, принятой за исходную.

За исходную цепь с матрицей $\mathbf{R_0}$ может быть принята любая цепь множества с данным инвариантом. Однако исключительно полезной для всей тактики исследования электрических цепей является возможность принимать за исходную цепь несвязное множество, например, контуров. Изучение свойств несвязных контуров, например, в отношении компенсации реактивных мощностей, качества переходных процессов и т. п. организовать гораздо проще. Затем они преобразованием с помощью $\mathbf{T}$ автоматически переносятся на любую связную цепь множества при данном инварианте.

Введение ортогональных преобразований открывает семейство преобразований исходной несвязной цепи в любую связную той же величины мощности потерь. То есть, вводится универсальное описание эквивалент-

ных по мощности преобразований цепи с неизменными и заданными энергетическими свойствами. При этом параметры несвязной цепи в случае принятия её за исходную становятся собственными числами матрицы **R** однородного базиса новой цепи, а столбцы преобразования **T** являются собственными векторами возможных состояний новой цепи.

Третья глава раскрывает суть элементов ортогонального преобразования как атрибутов спектрального представления описания цепи с заданным инвариантом. Таким образом, в практические расчёты электротехники вводятся весьма сложные, но чрезвычайно эффективные категории линейной алгебры в виде собственных чисел и собственных векторов. С их помощью легко обсуждаются проблемы жёсткости дифференциальных уравнений, проблемы чувствительности цепи, плохой обусловленности, сходимости итерационных методов, устойчивости схем численного интегрирования и т. п.

Четвёртая глава открывает минимаксную природу спектрального анализа. Любой стационарный режим цепи соответствует минимуму указанного выше функционала. Изложение обращается к принципу минимума потерь открытого ещё Максвеллом и Хевисайдом, но не нашедшего полезного применения до выработки инвариантных преобразований цепи.

В пятой главе рассматриваются частные вопросы спектрального представления электротехнических объектов самого разного назначения и свойств.

При построении учебного пособия учтён опыт и зарубежных учебников повышенного уровня ([4] и др.). В частности, использована тактика параллельного включения в рассмотрение проблем сосредоточенных цепей и полевых аспектов решений для цепи.

Таким образом, общий объём накопленного научного и методического материала позволяет говорить о серьёзной мотивации издания учебного пособия по теоретической электротехники повышенного уровня для магистров и аспирантов.

Библиографический список

1. Грамм, М.И. Вариант дедуктивной организации курса теоретической электротехники / М.И. Грамм // Электричество. – 1996. – № 10. – С. 62–70.

2. Грамм, М.И. Множество цепей с постоянной мгновенной мощностью и экстремальные принципы для цепей / М.И. Грамм // Электричество. – 2003. – № 4. – С. 37–43.

3. Грамм, М.И. Матрично-спектральные методы расчётов в электротехнике и принцип минимума потерь / М.И. Грамм, Ю.Н. Немов, Ф.Н. Шакирзянов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2006. – 204 с.

4. Hagman, G. Grundlagen der Elektrotechnik / G. Hagman. – AULA-Verlag GmbH, 2003. – 398 s.

УДК 621.3.016

ТРИ СОВРЕМЕННЫХ ПУТИ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ТРЁХФАЗНЫХ СИСТЕМ

М.И. Грамм

Рассмотрены основные предложения современных теорий электрической мощности для формирования алгоритмов энергоучёта в многофазных цепях. Сравнительные оценки подходов показывают эффективность использования ранее предложенных ортогональных преобразований цепей, эквивалентных по мощности и просто реализуемых при параметрах состояния, представленных в цифровой форме.

Ключевые слова: электрическая мощность; потребление энергии; энергоучёт; многофазные цепи

В работе [1] было предложено сравнение методов обработки текущих параметров состояния однофазной цепи при мониторинге мощностей. Приведены сравнительные оценки неточностей, вызванных нерегулярностями моментов учёта, и влияние на достоверность оценок. Ниже продолжено такое сравнительное описание методов для трёхфазной цепи. Изложение следует разделению методик на три группы – методы Фризе – Бухгольца – Депенброка (FBD), pq-теории и остающейся пока основной «консервативной теорией мощности» (CPT), [2–4]. Целью является выявление связи с введёнными в [1] величинами и с преобразованиями из [4].

В цепях с искажениями форм токов и напряжений теория более универсальным считает FBD-метод. В многофазных системах используется векторы ($\mathbf{U}$, $\mathbf{I}$) из напряжений и токов, заданных на m-полюсах многофазной цепи относительно произвольного единого нуля цепи (помечены звёздочкой *) и обобщённые мгновенные значения (u_Σ, i_Σ), [3]:

$$\mathbf{U}=\begin{bmatrix} u_{a*} \\ u_{b*} \\ u_{c*} \\ \dots \\ u_{m*} \end{bmatrix},\ \mathbf{I}=\begin{bmatrix} i_{a*} \\ i_{b*} \\ i_{c*} \\ \dots \\ i_{m*} \end{bmatrix},\ u_\Sigma=\sqrt{\sum_{\mu=1}^{m} u_{\mu*}^2}\ ,\ i_\Sigma=\sqrt{\sum_{\mu=1}^{m} i_{\mu}^2}\ . \tag{1}$$

На основе $\mathbf{U}$ и $\mathbf{I}$ водится обобщённая мгновенная мощность:

$$p_\Sigma=\mathbf{U}\cdot\mathbf{I}^T\ . \tag{2}$$

При равенстве времени T наблюдения периоду получим известные:

$$I_\Sigma=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_\Sigma^2 dt}\ ,\ U_\Sigma=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_\Sigma^2 dt}\ . \tag{3}$$

Теория FBD-метода вводит за время T так называемую обобщённую «активную мощность» P_Σ как главную категорию подхода:

$$P_\Sigma = \frac{1}{T}\int_0^T p_\Sigma dt\,. \tag{4}$$

Введение P_Σ по (4) позволяет мгновенный ток разложить на составляющие – активную (пропорциональную u_μ) и ортогональную. Активные токи $i_{a\mu}$ ответственны за энергию, переданную за время T учёта токами i_μ:

$$i_{a\mu} = \frac{P_\Sigma}{{U_\Sigma}^2}\cdot u_{\mu *} = G_a \cdot u_{\mu *}\,. \tag{5}$$

Остальные составляющие $i_{n\mu}$ токов, не участвующие в передаче средней величины энергии за время T, считаются неактивными:

$$i_{n\mu} = i_\mu - i_{a\mu}\,. \tag{6}$$

Далее FBD-метод вводит составляющие токов, связанные с обобщённой мгновенной мощностью (2). За колебания энергии в гармониках и неуравновешенностях системы ответственны «мощностные токи»:

$$i_{p\mu} = \frac{p_\Sigma}{{u_\Sigma}^2}\cdot u_{\mu *} = G_p \cdot u_{\mu *}\,. \tag{7}$$

Так называемые «безмощностные токи» не связаны с каким-либо запасом энергии в цепи и обусловлены местными искажениями формы:

$$i_{z\mu} = i_\mu - i_{p\mu}\,. \tag{8}$$

За колебания мгновенной эквивалентной проводимости G_p около средней G_a, а также за колебания p_Σ около P_Σ отвечают «вариационные токи»:

$$i_{v\mu} = i_{p\mu} - i_{a\mu} = i_{n\mu} - i_{z\mu}\,. \tag{9}$$

Таким образом, результирующее ортогональное разложение токов, предлагаемое FBD-методом, выглядит так:

$$\left\|i_\mu\right\|^2 = \left\|i_{a\mu}\right\|^2 + \left\|i_{n\mu}\right\|^2 = \left\|i_{a\mu}\right\|^2 + \left\|i_{v\mu}\right\|^2 + \left\|i_{z\mu}\right\|^2\,. \tag{10}$$

Сравнивая предлагаемые FBD-теорией величины с введенными в [1] величинами, а также с алгоритмами их обработки, легко заметим, что, помимо идентичности введённых в [1] проводимости и активной мощности, выявляются и пути цифровой реализации вычислений величин P_Σ и G_α в (4) и (5) выше. Таким образом, в целом алгоритмы FBD несложно реализовать в устройствах цифровой обработки информации при учёте энергии, потребляемой многофазной системой и дискретизации измерительной информации по [1]. Очевидно, выводы о влиянии интервала T учёта на погрешности учёта, сделанные в [1], распространяются и на трёхфазные системы при оценках мощностей по тактике FBD-метода.

Далее, рассматривая следующий метод учёта мощностей на основе pq-теории, невозможно не заметить принадлежности используемого в нём известного преобразования Эдит Кларк [3] к классу более общих и эквива-

лентных по мощности преобразований, введённых в [4]. Преобразование Э. Кларк переводит описание трёхфазной системы (a, b, c) токов и напряжений в описание в системе ортогональных координат (α, β, 0):

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_1 \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Перевод по (11) описаний не только фазовых напряжений (u_a, u_b, u_c), но и мгновенных токов (i_a, i_b, i_c) к координатам (α, β, 0) создаёт возможность описания свойств мощности трёхфазной системы двумя компонентами мгновенной мощности: реальной p и мнимой q мощностей. Рассматривая трёх- или четырёхпроводную цепи, определяют три мощностные компоненты: мощность нулевой последовательности p_0 (очевидно, только в четырёхпроводной схеме), реальную p и мнимую q мощности:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Отметим, что в известной литературе не обнаружено указаний на весьма полезное свойство принадлежности преобразования Э. Кларк к обобщающему классу эквивалентных по мощности ортогональных преобразований, предложенных в [4]. Как результат такой эквивалентности получаем мгновенную активную мощность системы в координатах (α, β, 0):

$$p_{3\phi} = p + p_0 = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta + u_0 \cdot i_0. \quad (13)$$

Мгновенная мнимая мощность в pq-методе определяется так:

$$q = u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta. \quad (14)$$

Введение двух мгновенных мощностей p и q даёт возможность обычными методами [1] выделить среднюю и колебательную составляющие:

$$p = \overline{p} + \tilde{p}, q = \overline{q} + \tilde{q}. \quad (15)$$

Учёту подлежат средние величины. Колебательные составляющие вызваны искажениями или неуравновешенностью в системе и при надобности учитываются по формулам, идентичным представленным в [1].

В третьей, консервативной теории мощности (СРТ) вводится комплексная мощность для синусоид, эквивалентных на тех или иных основах несинусоидальным токам и напряжениям. Это соответствует введению однородных координат как для интегралов, так и для производных по времени, оставляющих без изменения размерности напряжений, токов и мощностей. Использование прежних обозначений (см. выше) даст формулы [3]:

$$\hat{u}_\mu(t) = \omega \cdot (u_{\mu\int}(t) - \overline{u}_{\mu\int}),\ \ \hat{i}_\mu(t) = \omega \cdot (i_{\mu\int}(t) - \overline{i}_{\mu\int}),$$

$$\breve{u}_\mu(t) = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{du_\mu(t)}{dt},\ \breve{i}_\mu(t) = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{di_\mu(t)}{dt}, \qquad (16)$$

где ω – основная частота в сети, $u_\int(t)$ и $i_\int(t)$ интегралы по времени за период T частоты сети, $\overline{u}_{\mu\int}$ и $\overline{i}_{\mu\int}$ – средние значения за принятый период.

Поскольку такие напряжения и токи удовлетворяют законам Кирхгофа, то возможно оперирование в цепях с несинусоидальностями комплексными мощностями и их составляющими, разработанными для синусоидальных цепей. Предлагается модификация разложения синусоидальных токов добавлением мощности искажения *D*. Подход распространён на практике из-за известной физичности составляющих.

Таким образом, для многофазных систем в перспективе с развитием доли мощностей промышленной электроники и соответствующим ростом вставок постоянного тока, инверторов, альтернативных источников подход FBD представляется более точным, так как наименее других методик зависит от стабильности частоты сети и уровня несинусоидальностей., стандартом, на который ориентированы компенсационные мощности и основной персонал. При близких к синусоидальным режимах, как и в однофазных цепях [1], все три подхода дают близкие результаты.

Библиографический список

1. Грамм, М.И. Сравнительная оценка подходов при учёте мощностей / М.И. Грамм// Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 117–119.

2. Czarnecki, L.S. Comparison of Power Definitions for Circuits with Non-Sinusoidal Waveforms / L.S. Czarnecki // IEEE Tutorial Course on Non-Sinusoidal Situations, 90EH0327-7. – 1990. – P. 43–50.

3. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – N.Y., Tokyo, Wiley-Interscience, F John Wiley&Sons Inc.Publications. – 2007.

4. Грамм, М.И. Матрично-спектральные методы расчётов в электротехнике и принцип минимума потерь / М.И. Грамм, Ю.Н. Немов, Ф.Н. Шакирзянов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 204 с.

УДК 621.227

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОТАРАННОЙ УСТАНОВКИ ПУТЁМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

В.В. Бакунин

В статье представлена зависимость максимальной производительности гидротарана от регулируемых параметров – хода и массы ударного клапана, предложен способ автоматической регулировки, обеспечивающий максимальную производительность при изменении входного напора.

Ключевые слова: гидротаран, автоматизация, гидроэнергетика, насос.

Гидротаран – автоколебательная система, увеличивающая давление жидкости за счёт периодически повторяющегося гидравлического удара. Его можно назвать гидравлическим повышающим трансформатором, где аналогом напряжения является напор, а силы тока – расход. Другими словами – это насос без приводного двигателя, не требующий для своей работы ни электричества, ни топлива. Производительность гидротарана – это его расход на выходе. Под эффективностью регулировки гидротарана будем понимать отношение его автоматически регулируемой производительности к нерегулируемой производительности, настроенной на определённый входной напор $k_{эф} = (q_р/q_н - 1)\cdot 100$ %.

Расход гидротарана является функцией многих параметров [1].

$$q = f\left(H, h, m, \omega, \varsigma_{кл}, \varsigma_{тр}, E, K, \beta, \rho, a_0, g\right). \quad (1)$$

Используя методику расчёта производительности, изложенную в [1], автором статьи было выведено аналитическое выражение для производительности, в которую вошли эмпирически получаемые коэффициенты гидравлических сопротивлений $\varsigma_{кл}$ и $\varsigma_{тр}$, зависящих в свою очередь от настройки ударного клапана на ходу. Автором был предложен метод расчёта этих коэффициентов, основанный на принципе суперпозиции сопротивлений, изложенный в [2]. Для подтверждения этой зависимости, автором были изготовлены и испытаны два гидротарана на 100 и 50 мм питательной трубы. В результате выражение (1) получило законченное аналитическое выражение, использующее функции $\varsigma_{кл} = f(y)$ и $\varsigma_{тр} = f(y)$ и открывающее широкие возможности для анализа. Поскольку регулируемыми параметрами тарана являются ход клапана y и масса клапана m, были найдены максимумы функции (1) относительно этих регулируемых параметров при различных входных и выходных напорах для таранов различной мощности (табл. 1).

Таблица 1

	h, м	10			20			30		
H, м	d, мм	q_{max}, л/мин	m, кг	y, мм	q_{max}, л/мин	m, кг	y, мм	q_{max}, л/мин	m, кг	y, мм
1	50	3,7	0,52	14	1,8	0,53	14	1,2	0,54	14
	100	18,1	2,9	32	8,9	2,9	32	5,8	2,9	32
3	50	18,9	1,6	14	9,5	1,6	14	6,3	1,6	14
	100	94,3	8,8	32	46,8	8,8	32	30,9	8,8	32
5	50	40,1	2,7	14	20,3	2,7	14	13,6	2,7	14
	100	203,2	15	32	100,8	14,8	32	66,7	14,8	32

Анализ полученных результатов приводит к интересным практическим выводам. Для получения максимальной производительности регулировка хода зависит исключительно только от типоразмера тарана, т. е. от диаметра питательной трубы y = f(d) (рис. 1, а), а масса клапана является функцией от диаметра питательной трубы и входного напора m = f(d, H). Кроме того, масса клапана практически прямо пропорциональна входному напору (рис. 1, б).

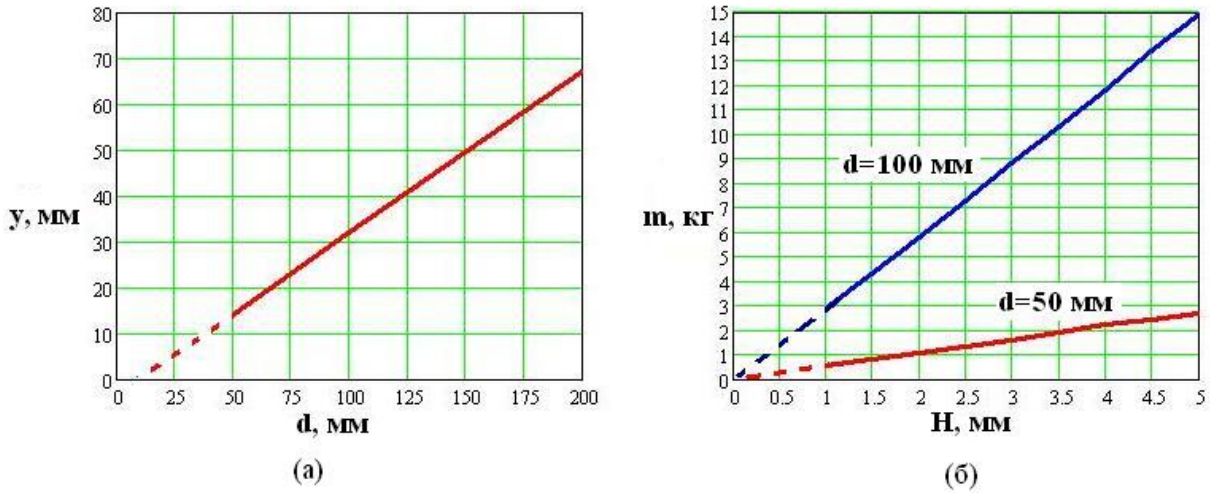


Рис. 1

Зависимость регулировки хода клапана от типоразмера (диаметра питательной трубы) гидротарана (а) и массы клапана от входного напора H у разных типоразмеров тарана (б) для поддержания максимального расхода гидротарана

Таким образом, чтобы поддерживать максимальную производительность, для каждого типоразмера тарана можно единожды настроить соответствующий ход клапана, а при изменении входного напора прямо пропорционально менять массу клапана. Коэффициент пропорциональности для каждого типоразмера будет свой. Как же в автоматическом режиме менять нагрузку на ударный клапан? Техническим решением подобной за-

дачи может быть замена нагрузочного элемента ударного клапана гидроцилиндром, давление на котором создаётся напором H (рис. 2).

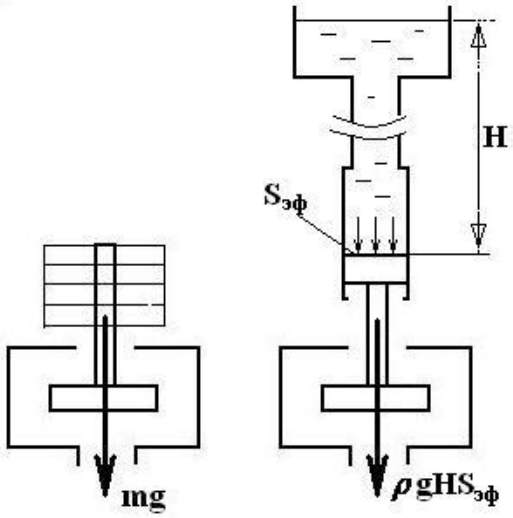


Рис. 2

Автоматически нерегулируемая и регулируемая схемы конструкции ударного клапана

В этом случае, вес нагрузки будет определяться уже не весом клапана mg, а силой давления столба воды H, и с изменением напора H будет изменяться прямо пропорционально этому напору, причём эффективная площадь гидроцилиндра определится:

$$S_{эф} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{m}{H}, \qquad (2)$$

где $\frac{m}{H}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый тангенсом угла наклона прямой функции массы m от входного напора H для типоразмера тарана (график б на рис. 1). Например, для гидротарана с диаметром питательной трубы 100 мм эффективная площадь нагрузочного гидроцилиндра будет равна 2900 мм^2 ($d_ц$ = 60 мм), обеспечивающая максимум производительности при любых входных напорах.

Рассмотрим эффективность регулирования. Определим, например, для тарана максимальную производительность при напоре H = 3 м и соответствующие этой производительности массу и ход клапана. Затем, повышая и понижая напор относительно 3 метров, будем находить регулируемую максимальную производительность и сравнивать с нерегулируемой производительностью, получаемую на этих варьируемых напорах, но с фиксированной нагрузкой, определенной при напоре 3 м. Напор на выходе 20 м. Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

	d = 50мм, y = 14 мм					d = 100 мм, y = 32 мм				
H, м	$m_н$, кг	$m_р$, кг	$q_н$, л/мин	$q_р$, л/мин	$k_{эф}$	$m_н$, кг	$m_р$, кг	$q_н$, л/мин	$q_р$, л/мин	$k_{эф}$
1	1,6	0,53	–	1,8	100	8,8	2,9	–	8,9	100
1,5	1,6	0,8	–	3,4	100	8,8	4,3	–	16,5	100
2	1,6	1,07	3,3	5,2	56	8,8	5,8	15,6	25,4	62,6
2,5	1,6	1,3	7	7,2	3,2	8,8	7,3	34,4	35,6	3,3
3	**1,6**	**1,6**	**9,5**	**9,5**	**0**	**8,8**	**8,8**	**46,8**	**46,8**	**0**
3,5	1,6	1,9	11,8	12	1,3	8,8	10,3	58,2	59	1,4
4	1,6	2,2	14	14,6	4,1	8,8	11,8	69,2	72	4,2
4,5	1,6	2,4	16,2	17,4	7,4	8,8	13,3	79,9	86	7,6
5	1,6	2,7	18,3	20,3	10,9	8,8	14,8	90,5	100,8	11,3

Примечание. $k_{эф} = \left(q_р / q_н - 1\right) \cdot 100\ \%$.

Таким образом, автоматизация позволяет:

1) поддерживать максимальный расход при изменении входного напора, что отражается в коэффициенте эффективности;

2) расширить границы использования гидротарана относительно входного напора. Для нерегулируемого тарана существует граница входного напора, ниже которой он не работает (две верхние строки табл. 2);

3) уменьшать металлоёмкость нагрузочных элементов за счёт использования одного и того же гидроцилиндра, что существенно сказывается при больших входных напорах на работе мощных таранов, в которых нагрузочный элемент эквивалентен массе в 400–500 кг.

4) увеличить мобильность использования гидротарана для потребителя без специальной настройки ударного клапана на входной напор. Предложенный способ автоматизации позволяет установить для конкретного типоразмера тарана гидроцилиндр определенного размера с ходом штока клапана определенной величины.

Библиографический список

1. Овсепян, В.М. Гидравлический таран и таранные установки / В.М. Овсепян: М.: Машиностроение, 1968. – 124 с.

2. Бакунин, В.В. Расчёт узла ударного клапана гидротарана / В.В. Бакунин // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. – 1996. – Т. 16. –С. 103–110.

УДК 621.227(470.55)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

О.С. Волкова

В статье предложена схема гидроэнергетической установки с регулированием стока и аккумуляцией потенциальной энергии воды в режиме пиковых нагрузок с целью оптимизации работы гидроэнергоблока и возможности повышения установленной мощности агрегата

Ключевые слова: гидроэнергетический потенциал, гидроэнергетическая установка, гидроаккумулирующая установка, гидротаран

Челябинская область является крупным потребителем энергоресурсов. Основными потребителями электроэнергии в области являются черная металлургия, жилищно-коммунальное хозяйство и машиностроительная отрасль.

Топливный баланс предприятий топливно-энергетического комплекса в настоящее время ориентирован на газ (около 48 %), местный уголь (около 36 %) и Экибастузский уголь (около 15 %). Своих газовых месторождений в области нет. Производственный потенциал АО «Челябинскуголь» использован на 80 %. Область не в состоянии обеспечить свои потребности в топливно-энергетических ресурсах [1].

За последние десять лет в области, как и в стране, увеличился объем производства, вследствие постепенного выхода страны из затянувшегося экономического кризиса. Пропорционально увеличению объема производства растет и потребление энергетических ресурсов. Но область и без этих мощностей не в состоянии обеспечить свои потребности в ТЭР (более 40 % количества электроэнергии область получает с оптового рынка ФСК ЕЭС).

Создать резерв мощностей, обеспечивающий энергобезопасность Челябинской области возможно несколькими способами, среди которых развитие альтернативной и малой энергетики и внедрение энергосберегающих технологий.

Повысить эффективность энергоснабжения потребителей можно за счет использования гидроэнергетических ресурсов, так как исторически сложилось, что в основном все населенные пункты располагаются вблизи водоемов. Область имеет валовый гидроэнергетический потенциал водохранилищ около 200 млн кВт·ч [2], который может быть использован при проектировании систем энергоснабжения автономных потребителей.

Абсолютное большинство водохранилищ области при классификации по объемам и площади относятся к категории малых. Самой многочислен-

ной является группа малых водохранилищ, емкостью до 10 млн м^3 (60 % от общего числа), которая насчитывает 383 объекта. Потенциальная энергия этих водохранилищ при 2500 часах использования для области составляет 1,5 млн кВт·ч, что соответствует установленной мощности менее 10 кВт. Это ограничивает применение данных ресурсов для электроснабжения потребителей.

Второй достаточно многочисленной группой водохранилищ являются водохранилища объемом от 1 до 10 млн м^3 (33 % от общего числа). Они обладают энергетическим потенциалом в пределах области около 6 млн кВт·ч, что соответствует установленной мощности 100 кВт, то есть здесь могут быть установлены микроГЭС.

Немногочисленную, но достаточно перспективную группу составляют водохранилища неэнергетического назначения с полным объемом больше 10 млн м^3 (7 % от общего числа), и только 6 водохранилищ имеют полный объем более 100 млн м^3 [3].

Малые гидроэлектростанции, сооружаемые при водохранилищах неэнергетического назначения, могут работать только в режиме попусков в нижний бьеф, подчиненных требованиям основных водопользователей.

Кроме этого, на ряде гидроузлов происходит снижение уровней верхнего бьефа, а, следовательно, напора до 50–60 % максимального. Если не производить регулирования, то ГЭС будет работать с переменной нагрузкой: большее количество месяцев с недогрузкой, а несколько месяцев необходимо рассеивать неиспользуемую потребителем на данный момент мощность, во избежание выхода из строя электрогенератора и систем контроля и управления.

Для наглядного представления этой ситуации в таблице автор приводит внутригодовое распределение стока в год 75%-обеспеченности для реки Уй п. Степное (3-й район гидроэнергетического районирования).

Внутригодовое распределение стока в год 75 % обеспеченности
для р. Уй п. Степное

Месяцы	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	Год
Доля стока	5,48	1,94	1,01	0,88	1,04	0,46	0,5	0,33	0,13	0,07	0,04	0,11	1
Расход, м^3/с	13,1	4,6	2,4	2,1	2,5	1,1	1,2	0,8	0,3	0,2	0,1	0,3	2,4
Объем стока, 10^6, м^3	34	12,5	6,3	5,6	6,7	2,9	3,2	2,1	0,8	0,4	0,2	0,7	75,5

Из таблицы видно, что расход воды в реке неравномерен в течение года. Кроме того, распределение стока отличается между годами. При выборе агрегатов ГЭС расчет установленной мощности производится для сред-

него значения расхода года 75%-обеспеченности. В многоводные годы расход воды увеличивается, и появляется возможность увеличить мощность станции. В маловодные годы гидроагрегат недогружен и вырабатывает меньшее количество энергии. Многолетнее регулирование стока требует создания водохранилищ большого объема.

Автором предложена гидроэнергетическая установка, позволяющая производить регулирование стока с максимально возможным использованием установленной мощности ГЭС.

Гидроэнергетическая установка включает в себя гидроэнергоблок, гидротаран, бак-аккумулятор и систему водоводов. Схема установки представлена на рисунке.

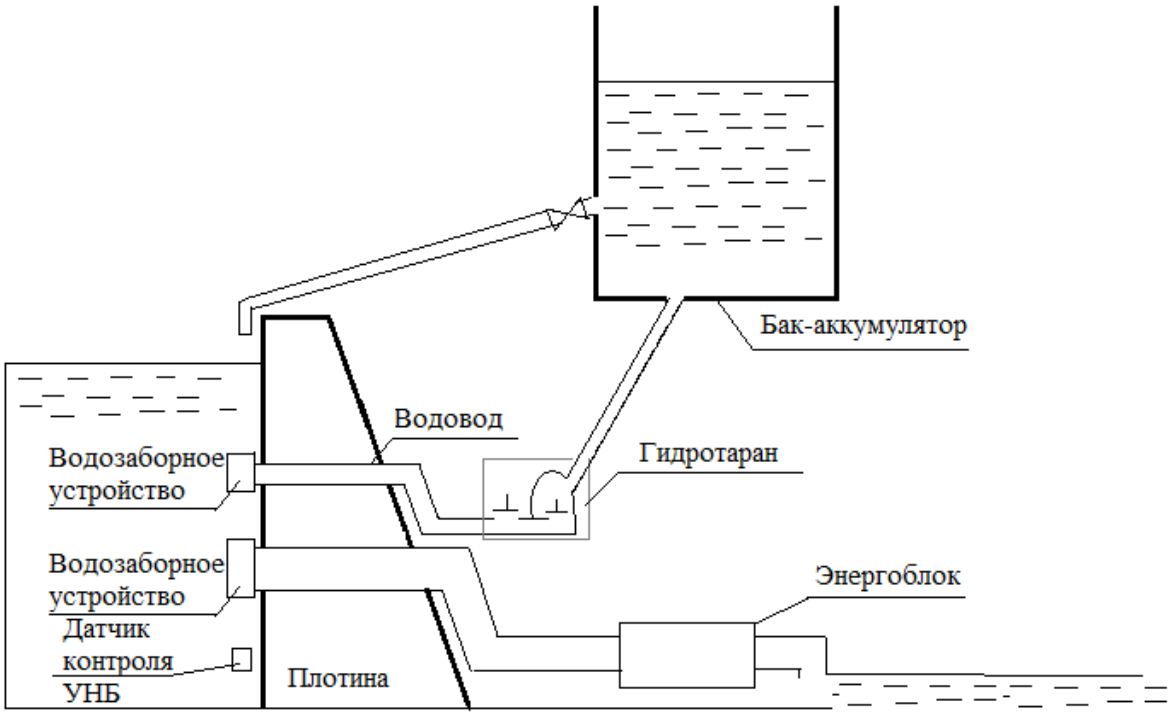


Схема гидроэнергетической установки

Гидроэнергетическая установка состоит из двух частей, работающих параллельно. Гидроэнергоблок предназначен для выработки электроэнергии, его мощность соответствует установленной мощности, выбранной по среднему расходу и среднему напору. Выше водовода энергоблока установлен водовод, питающий гидротаран, который используется для подачи воды в бак-аккумулятор при напорах, превышающих среднее значение. В периоды уменьшения напора ниже среднего значения вода из бака-аккумулятора будет подаваться в водохранилище. Весь процесс автоматизирован. Используя данную установку, можно выбрать гидроагрегат установленной мощностью для среднего значения расхода в год 50%-обеспеченности, то есть повысить мощность агрегата. В маловодные годы напор

воды будет поддерживаться за счет накопленной воды. Таким образом, производится не просто регулирование стока, но и максимальное использование гидроэнергетического потенциала водохозяйственного объекта.

Гидротаран в данной установке выполняет функцию насоса, но в отличие от электрических насосов он обладает следующими преимуществами:

– не потребляет электрическую энергию;

– простота конструкции, отсутствие вращающихся частей, повышают его надежность и долговечность;

– возможна автоматическая работа;

– характеристики могут изменяться в широком диапазоне;

– может работать при небольших питательных напорах;

– возможность параллельной работы нескольких гидротаранов с целью увеличения производительности [4].

Использование гидротарана позволяет уменьшить потребление электроэнергии на собственные нужды предлагаемой установки, и повысить ее эффективность.

В заключении хотелось бы сказать, что автором проводятся исследования по выбору оптимальных характеристик и оборудования установки, а также расчет экономической эффективности внедрения этих установок в существующие водохозяйственные объекты Челябинской области.

Библиографический список

1. Саплин, Л.А. Экономическое обоснование использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Челябинской области / Л.А. Саплин // Ползуновский альманах. – 1999. – № 1.

2. Пташкина-Гирина, О.С. Использование энергии малых рек и водохранилищ для энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей Челябинской области / О.С. Пташкина-Гирина, Л.А. Саплин // Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК: тез. докл. науч.-техн. конф. – Минск, 1997.

3. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: учеб. пособие / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, Ю.П. Ильин; под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Л.А. Саплина. – Челябинск: ЧГАУ, 2000. – 194 с.: ил.

4. Овсепян, В.М. Гидравлический таран и таранные установки. Теория, расчет и конструкции: учеб. / В.М. Овсепян. – М.: Машиностроение, 1968. – 124 с.

УДК 620.9.004.8

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ Smart Grid ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ ВЭУ

А.А. Козин

Произведен анализ современного состояния технологии Smart Grid в энергетике. Обоснована эффективность применения данной технологии. Рассмотрена разработка и реализация проектов с использованием технологии Smart Grid в ряде российских энергетических компаний. Сделаны выводы о необходимости использования Smart Grid при разработке проекта энергоснабжения объектов группой ВЭУ.

Ключевые слова: Smart Grid, Smart Metering, возобновляемые источники электроэнергии.

Электрическая сеть всегда строилась как система односторонней передачи. Она состояла из одной или нескольких очень мощных генерирующих станций, связанных с потребителями энергии. Переход к возобновляемым источникам энергии и появление новых интеллектуальных устройств требуют иного подхода – строительства интеллектуальной одноранговой сети. К примеру, сегодня некоторые домовладельцы пользуются собственными небольшими ветроэнергетическими установками. Это значит, что энергия и информация должна идти не только к потребителям, но и в обратном направлении [1].

Таким образом, коммунальные службы должны превратиться в информационные компании и передавать не только электричество, но и данные. Они должны в реальном времени оценивать спрос и адаптировать к нему свое предложение. При этом они могут в реальном времени передавать пользователям ценную информацию, чтобы регулировать спрос. Для этого им нужно модернизировать центры обработки данных (ЦОД) и развернуть безопасную коммуникационную инфраструктуру, подключающую к ЦОДам все элементы энергетической сети.

Технология Smart Grid решает множество проблем, стоящих перед энергетическими компаниями. Smart Grid – это интеллектуальные приборы учёта электроэнергии, динамическое управление электросетями, регулирование спроса, повышение безопасности и экономия расходов.

«Умный прибор учёта» (Smart Metering), установленный в жилых помещениях, может передавать данные о потреблении энергии практически в реальном времени, помогая потребителю принимать обоснованные решения о том, сколько энергии использовать и в какое время суток. Предполагается, что в будущем приборы учёта станут отслеживать потребление

энергии каждым домашним устройством и поддерживать определенные правила поведения в часы пиковой нагрузки и в другое время суток.

Такой подход даст преимущества не только потребителям, но и энергетическим компаниям, которые повысят эффективность своих процессов (за счет удаленного управления приборами коммерческого учёта электроэнергии) и смогут лучше бороться с кражами электроэнергии.

Кроме того, технология Smart Grid позволит наладить динамическое управление электросетями (Dynamic Grid Management) и регулировать спрос на потребление электрической энергии (Demand Response).

Стоит обратить внимание на то, что в настоящее время сети электропередач в мировой практике проектируются для удовлетворения пикового спроса, но строительство и эксплуатация избыточных мощностей на случай, если в час пик кому-то понадобится лишний киловатт, обходятся очень дорого. К тому же появляются огромные генерирующие мощности, которые большую часть времени простаивают.

Smart Grid позволяет регулировать спрос, сдвигая его по времени. Вместо того, чтобы использовать всю энергию в дневное время, можно целый ряд устройств: посудомоечные и стиральные машины, сушилки, зарядные устройства для электромобилей, – запускать в часы минимальной нагрузки (как правило, ночью).

Также, интеллектуальная IP-сеть решает многие вопросы информационной и физической безопасности. Передавая контрольную информацию по сети любого типа, потребитель должен быть уверен, что эту информацию никто не перехватит, не исказит и что никто не отключит работающие системы.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование технологии Smart Grid повышает эффективность работы энергосистемы, а также дает значительную экономию потребителям энергии.

В России существуют достаточные предпосылки для развития концепции Smart Grid. В качестве наиболее общих научно-технических предпосылок следует рассматривать наличие сохранившихся ключевых компетенций, как относящихся к отдельным элементам технологического базиса (линии сверхвысокого напряжения переменного и постоянного тока; противоаварийная автоматика; элементы интеллектуальных технологий в магистральных сетях: СТАТКОМ, сверхпроводники и т. д.; автоматизированное управление режимами работы энергообъединений; релейная защита и WAMS), так и отечественных работ по теории развития и управлению большими системами энергетики, по кибернетике энергосистем и др., ряд идей и результатов которых достаточно отчётливо прослеживается в рамках развиваемой за рубежом идеологии Smart Grid [2].

В настоящее время в ряде российских энергетических компаний разрабатываются и реализуются проекты, которые предусматривают использо-

вание элементов технологического базиса Smart Grid. Условно такие проекты можно разделить на группы:

- Системные проекты.

К данной группе можно отнести один из важнейших реализуемых в настоящее время проектов в интересах ОАО «СО ЕЭС» – создание системы SCADA EMS.

- Инфраструктурные проекты.

– система FACTS, создаваемая в настоящее время ОАО «ФСК ЕЭС» совместно с ОАО «СО ЕЭС»;

– программа создания информационно-измерительной системы коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ);

– система мониторинга переходных режимов (WAMS) в России, состоящая из регистрирующих приборов, систем обмена информацией между концентраторами данных и центрами управления, а также средств обработки полученной информации;

– волоконно-оптические линии связи;

– ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «МРСК Холдинг» с 2006 г. ведется работа по созданию новой целевой модели оперативно-диспетчерского управления ЕНЭС России и практической реализации этой модели в рамках создаваемых Центров управления сетями ОАО «ФСК ЕЭС» и РСК – ЦУС;

– совершенствование устройств РЗиА, ПА, АСДУ, выработка единых протоколов взаимодействия различных IT-систем в электроэнергетике.

- Локальные проекты.

К этой группе относятся проекты, реализуемые различными энергетическими компаниями, как правило, сбытовыми и электросетевыми: организация систем многотарифного учёта, установка биллинговых систем, реализация устройств дистанционного ограничения и отключения. Примеры инсталляций таких систем единичны. Системы работают разрозненно, на различной элементной базе и своих внутренних протоколах.

К локальным проектам можно отнести работу ветроэнергетических установок с использованием технологического базиса Smart Grid

Введение в эксплуатацию ветроэнергетических станций предъявляет новые требования к принципам управления энергосистемой. Это связано, прежде всего, с поддержанием устойчивости работы в виду зависимости ветроэнергетических установок от текущих метеоусловий. Такая зависимость предполагает нестабильную генерацию мощности в узлах энергосистемы. В связи с этим встает вопрос о формировании принципиально новых принципов прогнозирования нагрузки с учётом работы ВЭУ, а также построении новой системы управления и противоаварийной автоматики.

В данном случае для управления энергосистемой, работающей параллельно с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), в масштабе реального времени используется так называемая виртуальная электростан-

ция, в задачу которой входит стабилизация графика нагрузки, а также моментов подключения наиболее оптимальных по мощности генерации ВИЭ в определенный момент.

Для стабилизации графика загрузки в Smart Grid предусматривается активное использование накопителей энергии, таких как конденсаторных и аккумуляторных батарей, топливных водородных элементов. Большую роль при построении энергосистемы является принцип децентрализации и использование помимо источников средней и большой мощности источников малой мощности (малая генерация).

Технология Smart Grid позволяет оптимизировать использование ВИЭ и минимизировать коллективное воздействие общества на окружающую среду, кроме того, данная технология способна чувствовать, когда часть её системы перегружена и перенаправлять мощность для снижения этой перегрузки и предупреждать аварийные простои. SmartGrid способна в реальном времени коммуницировать между потребителями и выгодно позволяет оптимизировать эффективное обращение с энергией на основе преимущественного отношения к окружающей среде и цене [3].

Таким образом, можно сделать вывод, что для реализации проекта энергоснабжения объектов с помощью группы ветроустановок, неотъемлемой частью проекта должно быть внедрение технологии Smart Grid с целью оптимизации и повышения эффективности работы рассматриваемой системы [4].

Библиографический список

1. http://www.facepla.net/index.php/content-info/210-what-is-smart-grid

2. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 154 с.

3. http://smartgrid.donntu.edu.ua/

4. The comparative analysis of wind farms built on the basis of vertical-axis and horizontal-axis wind turbines - Materiály VIII mezinárodní vědecko – praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2012». – Díl 27. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – P. 72–76.

УДК 621.31.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.С. Мартьянов

В статье описана программа для расчета графика потребления электрической энергии, использующаяся при математическом моделировании систем электроснабжения.

Ключевые слова: электрическая энергия, потребитель, нагрузка, математическое моделирование.

При разработке и исследовании различных систем электроснабжения часто возникает необходимость качественного математического моделирования. Существенным этапом моделирования системы электроснабжения является построение математической модели потребления электрической энергии.

Обычно потребителями электрической энергии являются различные бытовые электрические приборы, управляемые человеком в зависимости от собственных нужд [1]. Поэтому моделирование такого потребления является непростой задачей, требующей создания сложной математической модели, учитывающей не только распределение работы электроприборов во времени, но и вероятностный характер использования этих электроприборов человеком. Такая математическая модель может быть разработана с применением специализированных систем, примером которых являются MATLAB, VISSIM и др. [2]. Другим способом моделирования потребления электрической энергии является разработка компьютерной программы для моделирования нагрузки, создаваемой различными потребителями и построения графика потребляемой мощности в зависимости от времени.

Исходными данными для работы такой программы является информация о мощности потребителей, время включения и выключения, режим работы по дням недели. Дополнительно необходимо задать вариацию времени возникновения события и вероятность включения этого потребителя. В качестве примера такого потребителя можно привести телевизор, который включается по вечерам будних дней и может быть включен в любое время в течение выходного дня. Вся информация о таких потребителях задается через интерфейс программы и сохраняется в локальной базе данных, доступной для редактирования. Общий вид окна программы представлен на рис. 1.

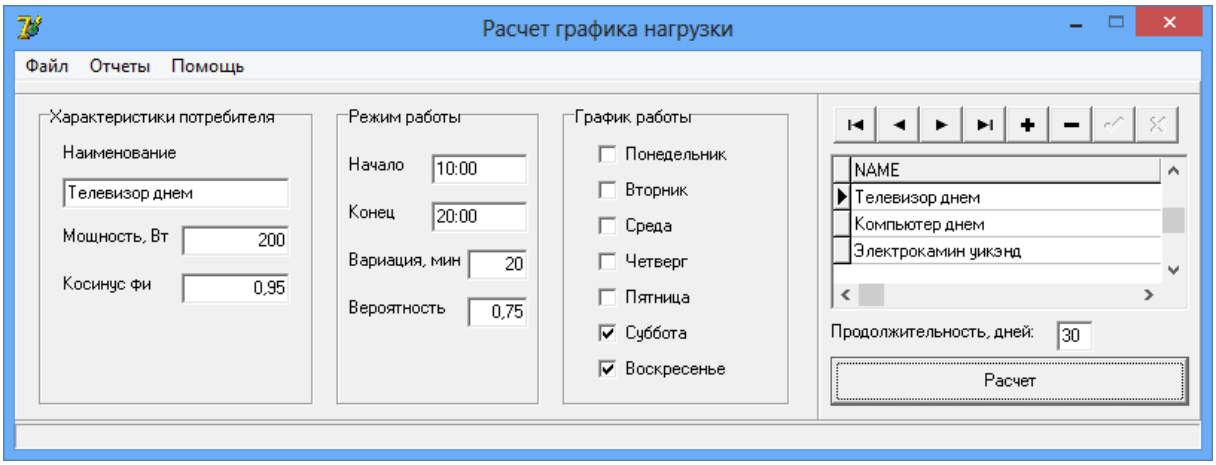


Рис. 1. Общий вид окна программы

После задания исходных данных возможно запустить модуль расчета графика потребления для заданного количества дней. Расчет выполняется по следующим формулам:

$$S_{потр.}(t) = \sum_{i=1}^{N} \frac{P_i \cdot X_i}{\cos\varphi}, \quad (1)$$

где $S_{потр}$ – потребляемая полная мощность, Вт;

P_i – потребляемая активная мощность потребителя, Вт;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности потребителя;

X_i – разрешение включения потребителя, рассчитываемое по формуле

$$X_i = \begin{cases} 1, & A_i < RND_i \\ 0, & A_i \geq RND_i \end{cases}, \quad (2)$$

где A_i – заданная вероятность включения потребителя;

RND – случайная величина в диапазоне от 0 до 1.

Время включения и выключения потребителя рассчитывается по формулам:

$$t_{on} = t_{start} + (t_{var} \cdot RND - \frac{t_{var}}{2}); \quad (3)$$

$$t_{off} = t_{finish} + \left(t_{var} \cdot RND - \frac{t_{var}}{2}\right), \quad (4)$$

где t_{on} – время включения потребителя;

t_{off} – время выключения потребителя;

t_{var} – вариация времени совершения события.

Результатом работы программы является график потребления электрической энергии, пример которого приведен на рис. 2, где по оси абсцисс располагается время, а по оси ординат – потребляемая мощность.

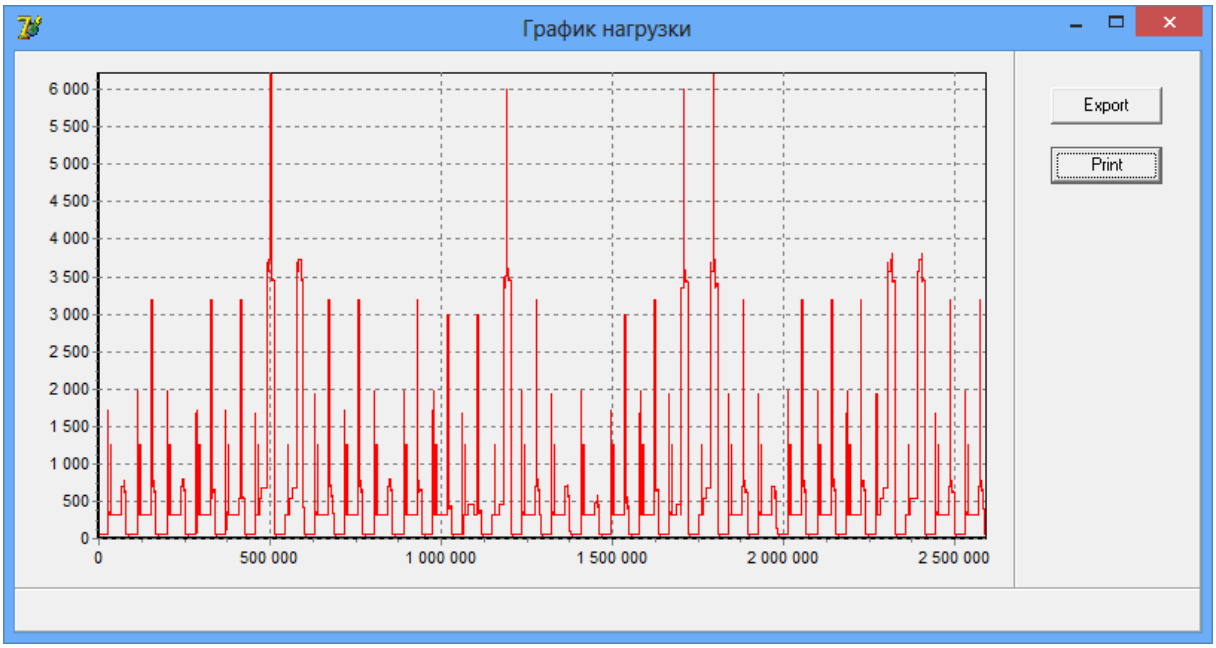


Рис. 2. График потребления электрической энергии

Дополнительная возможность, которую предоставляет программа, это возможность экспортирования результата моделирования в файл данных. Затем этот файл может быть использован в качестве исходных данных о потреблении электрической энергии в различных программах, таких как VISSIM или MATLAB, рис. 3.

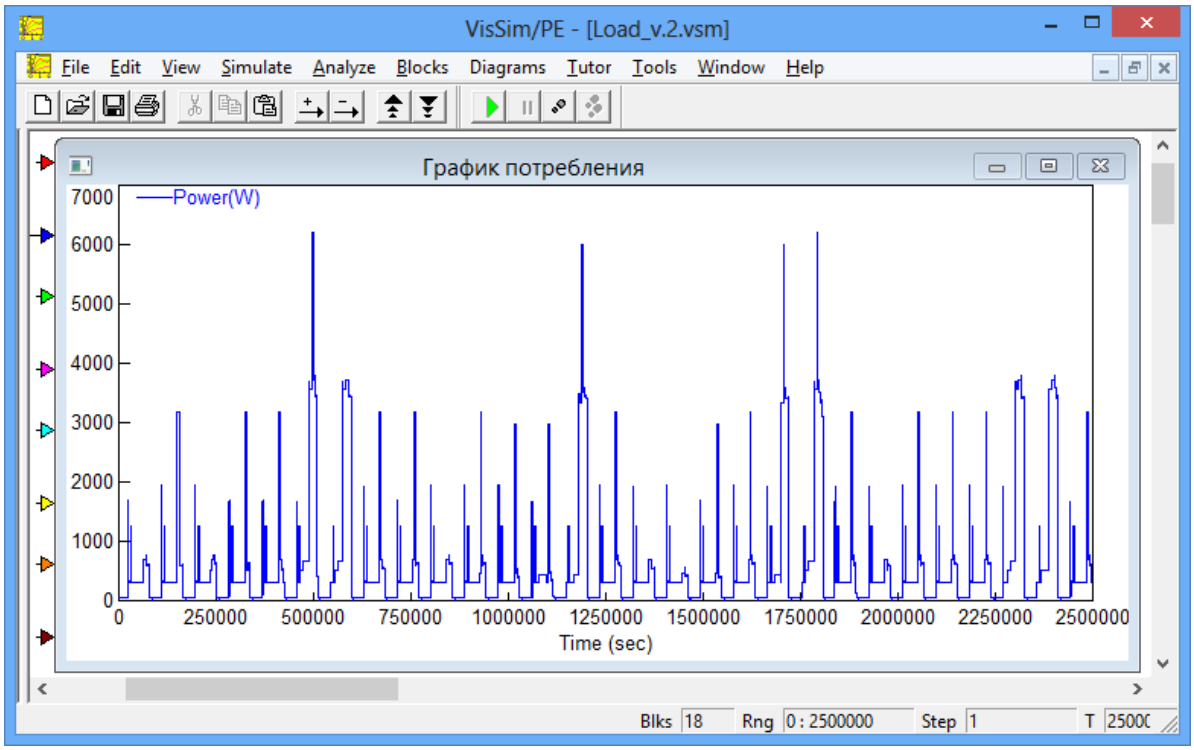


Рис. 3. Рассчитанный график потребления в системе VISSIM

Примером использования этих данных может являться как расчет таких параметров потребления, как среднее или пиковое значения потребляемой мощности, так и использование в качестве задающего значения при построении математических моделей различных систем электроснабжения. Результаты работы программы были использованы при моделировании автономной системы электроснабжения мощностью 3кВт, основанной на возобновляемых источниках энергии [3].

Выводы

– Математическое моделирование позволяет существенно сократить сроки проектирования и исследования автономных систем электроснабжения.

– Предлагаемая программа для моделирования потребления электроэнергии является универсальной и может быть использована при моделировании систем электроснабжения любой мощности.

– Предлагаемая программа может быть использована при проведении лабораторных работ в рамках курса «Использование возобновляемых источников энергии».

– В качестве направления дальнейшего развития, программа может быть дополнена модулями для исследования статистических свойств полученной характеристики, модулями моделирования изменения энергопотребления при отоплении помещения в зависимости от температуры окружающей среды и заданных свойств помещения.

Статья подготовлена в рамках Соглашения 14.B37.21.1226 от 14.09.2012 г. между ЮУрГУ и Минобрнауки РФ (2 этап).

Библиографический список

1. Мартьянов, А.С. О преобразовании энергии в ветроэнергетических установках малой мощности / А.С. Мартьянов, И.М. Кирпичникова // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 2. – 304 с.

2. Дьяконов, В.П. VisSim + Mathcad + MATHLAB. Визуальное математическое моделирование / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

3. Пронин, Н.В. Разработка математической модели ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ-Вертикаль в пакете Matlab / Н.В. Пронин, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2011 – № 5. – С. 41–44.

УДК 620.9(470.55) + 577.23(470.55)

ВОЗМОЖНОСТИ БИОТЕХНОЛОГИЙ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИКИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Р.Р. Нараева, А.А. Нараева, Е.С. Бодрова, А.А. Горбунова

Возможности применения биотехнологий при переработке отходов птицеводства, лесопромышленного комплекса и твердых бытовых отходов Челябинской области.

Ключевые слова: биотехнология, биогаз, пеллеты, органические отходы, электроэнергия.

Получение энергии на основе переработки биомассы является важнейшим перспективным направлением развития биотехнологий. Современное развитие биотехнологий позволяет решить сразу четыре глобальные проблемы [1]:

- экологическую – переработка органических отходов;
- энергетическую – производство биотоплива, электрической и тепловой энергии;
- агрохимическую – производство экологически чистых высокоэффективных органических удобрений;
- социальную – улучшение условий труда и быта, особенно в сельской местности.

При решении этих проблем можно получить энергию, необходимую в хозяйствах Челябинской области.

Основным положением использования биомассы с точки зрения энергетики является ее преобразование в биотопливо, которое по структуре может быть газообразным, жидким, твердым.

Все перечисленные виды топлив можно использовать в качестве энергоносителя для транспорта и тепловых электростанций.

Способы получения различных агрегатных состояний топлива зависят от исходного продукта. Например, газообразное топливо – метан может быть получен как из природных газогидратов, так и как синтетический газ при пиролизе твердых бытовых отходов (ТБО), древесины, сланцев. Кроме того, метан может быть получен в виде биогаза в процессе метаногенеза (анаэробного сбраживания).

Источниками для вышеприведенных технологических процессов являются:

- активный ил и осадки городских стоячных вод;
- отходы с/х производства (животноводство, птицеводство, растениеводство и др.);
- аквакультура (водные растения, морские водоросли);

- ТБО (отходы в жилом секторе, дорожный и дворовый мусор, отходы от предприятий торговли, административных учреждений и офисов, культурно-спортивных учреждений).

Кроме того, ТБО можно сжигать на мусоросжигательных заводах с получением тепловой энергии. Сбор и утилизация биогаза с полигонов ТБО снижает эмиссию парниковых газов (метана), что дает экологический эффект.

В работе были выполнены оценочные расчеты, которые показывают возможность получения электроэнергии из ТБО, отходов птицефабрик и отходов лесозаготовок.

Для оценки экономической целесообразности применения биотехнологий в аграрном секторе в качестве примера была рассмотрена Аргаяшская птицефабрика с ежедневным выходом куриного помета 390 тонн и годовым – 142 000 тонн.

В Челябинской области насчитывается свыше десятка птицеводческих предприятий. Для расчетов по каждой птицефабрике принято среднее суточное количество помета в размере 300 тонн. В год по области образуется свыше 1 млн тонн куриного помета, которые складируется на полях без должной очистки и подготовки, нанося тем самым непоправимый вред окружающей среде. В связи с этим наиболее перспективным и экологичным способом переработка отходов птицеводческих, в том числе и животноводческих предприятий, считается анаэробного сбраживания в биогазовых установках (БГУ).

Применение БГУ в масштабах области в среднем позволяет получить 273 000 м^3 биогаза в день или примерно 100 млн м^3 биогаза в год, что соответствует 60 млн м^3 природного газа или 80 млн м^3 нефти в год.

Полученные результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	Аргаяшская птицефабрика	Птицефабрики Челябинской области
Количество помета в сутки, т/день	390	3 000
Годовое количество помета, т/год	142 000	1 095 000
Выход биогаза на тонну субстрата, м^3/т	91	91
Выход биогаза в день, м^3/день	35 500	273 000
Выход биогаза в год, м^3/год	13 000 000	100 000 000
Производство электроэнергии из биогаза в год, ГВт-ч	35	270
Производство тепловой энергии из биогаза в год, ГВт-ч	34,6	267
Годовая экономия по электрической энергии, млн руб./год	70	540

Другим источником сырья для получения биогаза в Челябинской области являются твердые бытовые отходы.

По данным Министерства по радиационной и экологической безопасности и экологии Челябинской области, ежегодно в области образуется более 90 млн тонн отходов, из которых доля ТБО составляет около 1,5 млн тонн. В городах и районных центрах не развита система раздельного сбора и сортировки бытовых отходов, ТБО в основном складируются на полигонах и свалках, занимая огромные территории.

Свалочный биогаз, получаемый при анаэробном разложении, имеет примерно следующий состав: 50–55 % CH_4, около 40 % CO_2 и 5 % N_2.

Расчеты по выходу биогаза из ТБО производились по методике АКХ им. К.Д. Памфилова, НИИ Атмосфера, НИИ Экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.М. Сысина, НПП «Экопром», НПП «Логус».

Удельный выход биогаза за период его активной генерации при метановом брожении:

$$Q = 10^{-6} R(100 - W)(0{,}92\text{Ж} + 0{,}62\text{У} + 0{,}34\text{Б}) = 0{,}2044 \text{ кг/кг отходов,}$$

где R – содержание органической составляющей в отходах (70 %), W – влажность отходов (50 %), Ж – содержание жироподобных веществ в органике отходов (2 %), У – содержание углеводоподобных веществ в органике отходов (83 %), Б – содержание белковых веществ в органике отходов (15 %).

Количественный выход биогаза за год, отнесенный к тонне отходов:

$$P_{\text{уд}} = Q10^{-3} / t_{\text{сбр}} = 4{,}4 \text{ кг/т отходов в год,}$$

где $t_{\text{сбр}}$ – период полного сбраживания органической части отходов, для Челябинской области равен 46,5 лет.

Из 1,5 млн тонн отходов может быть получено 5 млн м^3 биогаза в год, что соответствует 3 млн м^3 природного газа, или 4 млн м^3 нефти.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Объем ТБО в год, млн т	1,5
Выход биогаза в год, млн м^3/год	5
Энергетический потенциал свалочного биогаза, кВт-ч/м^3	1,5
Производство электроэнергии из биогаза в год, ГВт-ч	7,5
Годовая экономия по электрической энергии, млн руб./год	15

Другая немаловажная проблема, связанная с экологией и дополнительной выработкой энергии из отходов производства находится в области лесозаготовок.

Освоение расчетной лесосеки в 2011 году по Челябинской области составило около 1 млн 400 тыс м^3. При оценке энергетических ресурсов отходов лесозаготовок [2] расчетный объем древесных отходов составил

800 000 м^3, с количеством тепловой энергии $5{,}2 \cdot 10^6$ ГДж или $1{,}24 \cdot 10^6$ Гкал. Полученный объем отходов можно преобразовать в пеллеты, имеющие большую энергетическую ценность по сравнению с исходным сырьем. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетная лесосека, м^3		1 400 000
Объем древесных отходов, м^3		800 000
Количество тепловой энергии	ГДж	$5{,}2 \cdot 10^6$
	Гкал	$1{,}24 \cdot 10^6$
Годовой объем производства пеллет, т/год		370 000
Годовая экономия по тепловой энергии, млн руб./год		720

Таким образом, применяя биотехнологии в переработке вторичного сырья и отходов производства и предприятий сельского хозяйства Челябинской области можно:

- получить дополнительно 277,5 ГВт-час электроэнергии;
- переработать 1,5 млн т отходов, загрязняющих окружающую среду;
- получить 143 000 т удобрений в год (с содержанием СВ 88 %),

тем самым выделить дополнительные сэкономленные средства 1 млрд 275 млн руб. на социальные нужды области.

Кроме того, можно децентрализовано получать тепловую и электрическую энергию, при этом сэкономить на стоимости прокладки за каждые 100 метров длины [3]:

- низковольтного кабеля – 42 500 руб.,
- газопровода – 100 000 руб.,
- теплотрассы – более 100 000 руб.

Библиографический список

1. Елистратов, В.В. Использование возобновляемой энергии: учеб. пособие / В.В. Елистратов. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 224 с.

2. Нараева, Р.Р. Ресурсы древесной биомассы Челябинской области в развитии биоэнергетики / Р.Р. Нараева, А.А. Нараева // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 215–218.

3. Шешуков, В.В. Автономное энергоснабжение загородного дома / В.В. Шешуков // Наука ЮУрГУ: материалы 60-й юбилейной науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – Т. 1. – С. 201–203.

УДК [630:620.9](470.55) + 620.9(470.55)

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ОТХОДОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Р.Р. Нараева, А.В. Бондаренко, А.А. Нараева

Проанализированы ресурсы древесной биомассы и возможность ее использования в качестве энергетического сырья для Челябинской области.

Ключевые слова: биоэнергетика, древесная биомасса, древесные отходы, пеллеты.

Биомасса является одним из наиболее доступных возобновляемых источников энергии. Развитие биоэнергетики как в целом по России, так и по регионам в отдельности на сегодняшний день является актуальным в решении таких важных проблем как энергосбережение и экология. Челябинская область обладает достаточным запасом древесной биомассы, что позволяет развивать биоэнергетику области. Общая площадь земель лесного фонда Челябинской области, с расположенными на ней 30 лесхозами и 2 национальными парками равна 2,8 млн га. Лесной фонд области на 70 % расположен в горнолесной зоне, на 20 % – в лесостепной малолесной зоне, на 6 % – в степной зоне. Лесистость по области в среднем составляет 27 %.

На примере государственного природного национального парка Таганай, проанализированы ресурсы древесной биомассы и возможность ее использования в качестве энергетического сырья. Национальный парк расположен на территории в 56 843 га, из них покрытые лесом земли составляют 52 759 га. Леса парка Таганай выполняют защитные функции и по категории относятся к лесам, расположенным на особо охраняемых природных территориях. По лесообразующим породам хвойное хозяйство (сосна, ель, пихта, лиственница) занимает площадь в 27 096 га, мягколиственное хозяйство (береза, осина) – 24 891 га. Средний возраст хвойных лесов – 106 лет, мягколиственных лесов – 64 года. Ежегодный допустимый объемом изъятия древесины по национальному парку Таганай составляет 8,46 тыс. $м^3$ на площади 398,4 га (в основном по хвойным хозяйствам).

Принятая лесосека из назначенного в рубку объема, согласно нормативам Лесохозяйственного регламента, позволяет получить:

- деловой древесины (древесина отпускного диаметра, предназначенная для переработки и продажи) – 4,58 тыс. $м^3$;
- «отходов» – 3,88 тыс. $м^3$.

В данные «отходы» теоретически допускаются только:

- дрова технологические и топливные (дровяная древесина);
- «чистые отходы» – отходы, включающие вершинки деревьев, кору деловой древесины и дрова технологические, предусмотренные ГОСТ (составляют 7–15 % от общего объема рубки, для хвойных пород – 6–12 %).

В табл. 1 приведены нормативные данные по ежегодным объемам изъятой древесины для разных категорий рубок.

Таблица 1

№ п/п	Наименование п/п	Виды рубок				Итого
		А	Б	В	Г	
1	Площадь, га	64(36-хв)	147	63,4	124	398,4
2	Лесосека (предполагаемый ЛЗ), тыс. $м^3$	2,9	0,6	2,66	2,3	8,46
3	Деловая древесина, тыс. $м^3$	2	0,3	1,88	0,4	4,58
4	Дрова (технологические, топливные), тыс. $м^3$	0,9	0,1	0,39	–	1,39
5	«Чистые» отходы (А,Б,В) / сухостой (Г), тыс. $м^3$	–	0,2	0,39	1,9	2,49
6	Отходы (п/п: 4 + 5), тыс. $м^3$	0.9	0.3	0.78	1.9	3.88
7	Отходы от деловой древесины (50 %), тыс. $м^3$	1	0,15	0,94	0,2	2,29
8	Σ отходов (п/п: 6 + 7), тыс. $м^3$	1,9	0,45	1,72	2,1	6,17

Примечания: А – рубка лесных насаждений при уходе за лесами; Б – рубка поврежденных и погибших лесных насаждений; В – рубка лесных насаждений на лесных участках, предназначенных для эксплуатации объектов лесной инфраструктуры; Г – санитарно-оздоровительные мероприятия; ЛЗ – ликвидный запас; хв – хвойное хозяйство.

Фактически, корневой запас, отведенный в рубку, используется в среднем на 70 %. Из-за невысокой технологии лесозаготовок, объем оставленной на вырубках ликвидной древесины может составить 30 %. Эту величину можно отнести к «запланированным» или «технологическим» потерям ликвидной древесины. На основании теоретических расчетов, по разработанным и внедренным в практику нормативам получены данные по ежегодным объемам изъятой древесины для разных категорий рубок (А, Б, В, Г) с учетом технологических потерь (табл. 2).

Таблица 2

№ п/п	Наименование п/п		Виды рубок				Итого
			А	Б	В	Г	
1	Лесосека (предполагаемый ЛЗ), тыс. $м^3$		2,9	0,6	2,66	2,3	8,46
2	ТП (30 %), тыс. $м^3$		0,87	0,18	0,798	0,69	2,54
3	ЛЗ (с вычетом ТП), тыс. $м^3$		2,03	0,42	1,862	1,61	5,92
4	Деловая древесина, тыс. $м^3$		1,44	0,21	1,322	0,267	3,24
5	Дрова, тыс. $м^3$	технологические	0,203	0,07	0,186	–	0,654
6		топливные	0,102		0,093	–	
7	«Чистые» отходы (А, Б, В) / сухостой (Г), тыс. $м^3$		0,284	0,14	0,261	1,333	2,018

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование п/п	Виды рубок				Итого
		А	Б	В	Г	
8	Отходы (п/п: 5 + 6 + 7), тыс. м^3	0,59	0,21	0,54	1,333	2,67
9	Отходы с учетом ТП (п/п: 2 + 8), тыс. м^3	1,46	0,39	1,338	2,023	5,21
10	Отходы от деловой древесины (50 %), тыс. м^3	0,72	0,105	0,661	0,134	1,62
11	Σ отходов (п/п: 8 + 10), тыс. м^3	1,31	0,315	1,201	1,467	4,29
12	Σ отходов с учетом ТП (п/п: 9 + 10), тыс. м^3	2,18	0,495	1,999	2,157	6,83

Примечание: ТП – технологические потери.

При подсчете возможных отходов в процессе лесозаготовок не учитывалась древесная зелень. Глубокая переработка лесосеки с применение современных передовых технологий позволит уменьшить технологические потери до минимума. В табл. 3 для сравнения приводятся результаты расчетов лесосеки при 20 % технологических потерях.

Таблица 3

№ п/п	Наименование п/п		Итого
1	Лесосека (предполагаемый ЛЗ), тыс. м^3		8,46
2	Технологические потери (20 %), тыс. м^3		1,692
3	ЛЗ (с вычетом технологических потерь), тыс. м^3		6,768
4	Деловая древесина, тыс. м^3		3,72
5	Дрова, тыс. м^3	технологические	0,748
6		топливные	
7	«Чистые» отходы (А, Б, В) / сухостой (Г), тыс. м^3		2,303
8	Отходы (п/п: 5 + 6 + 7), тыс. м^3		3,05
9	Отходы с учетом ТП (п/п: 2 + 8), тыс. м^3		4,742
10	Отходы от деловой древесины (50 %), тыс. м^3		1,859
11	$\sum$ отходов (п/п: 8+10), тыс. м^3		4,91
12	$\sum$ отходов с учетом ТП (п/п: 9+10), тыс. м^3		6,601

Объем дровяной древесины, «чистых» отходов и отходов от деловой древесины (ДД) в процессе деревопереработки ($V_{отх}$) рассчитан для 0 %, 20 % и 30 % технологических потерь. С учетом плотности древесины преобладающих лесообразующих пород (масса «плотного» кубического метра принята равной 0,9 т для дровяной древесины и 0,5 т для «чистых» отходов и отходов от ДД) и ее относительной влажности (соответственно 55 % и 20 %), рассчитан вес биомассы древесных отходов (m) и ее вес по сухой массе ($m^{сух}$). Вычислено значение тепла (Q) с учетом теплотворной способности ($Q^р_н$ = 14 МДж/кг) и величина технического потенциала ($W_т$) использования отходов лесных рубок. Результаты расчетов в табл. 4.

Таблица 4

ТП	0 %			20 %			30 %		
Виды отходов	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.
$V_{отх}$, тыс $м^3$	1,39	2,49	2,29	0,748	2,303	1,86	0,654	2,018	1,62
$\sum V_{отх}$, тыс $м^3$	6,17			4,91			4,29		
m, т	1250	1245	1145	673	1150	930	587	1010	810
$\sum m$, т	3640			2753			2407		
$m^{сух}$, т	654	1158	1065	352	1070	865	307	940	753
$\sum m^{сух}$, т	2877			2287			2000		
Q, МДж	$40 \cdot 10^6$			$32 \cdot 10^6$			$28 \cdot 10^6$		
$W_т$, тут	2275			1721			1504		

Примечания: Др. д. – дровяная древесина; Чист. отх. – «чистые» отходы, Дел. отх. – отходы от ДД.

Прямое сжигание древесной биомассы сопровождается значительными потерями (до 70 %). Более эффективным является преобразование древесных отходов в пеллеты, имеющие большую энергетическую ценность по сравнению с исходным сырьем. Исходя из полученных объемов сырья, рассчитан годовой объем производства пеллет ($m_{гр}$). Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

ТП	0 %			20 %			30 %		
Виды отходов	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.	Др. д.	Чист. отх.	Дел. отх.
$m_{гр}$, т	688	1122	1032	370	1037	838	324	909	730
$\sum m_{гр}$, т	2842			2245			1963		

Можно сделать вывод о достаточном количестве древесной биомассы, которой располагает Челябинская область, для использования в качестве биоэнергетического сырья.

Библиографический список

1. Бегунков, О.И. Использование низкотоварной древесины и отходов лесопромышленного производства: практ. руководство / О.И. Бегунков, Н.В. Выводцев, В.В. Гурьев и др. – Хабаровск.: Изд-во ХГТУ, 2003. – 132 с.

2. Проект освоения лесов расположенных на землях Национального парка «Таганай» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное государственное учреждение «Национальный парк «Таганай», Златоуст, 2009.

УДК [620.9:658](470.55)

ВЫБОР СХЕМЫ ОТБОРА ТЕПЛА ОТ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

О.С. Пташкина-Гирина, Р.Ж. Низамутдинов

В статье на основании детального анализа существующих схем отбора тепла от низкопотенциального источника с учетом производственного опыта реализации подобных схем в условиях Южного Урала предлагается более эффективная схема с использованием принципа прямого кипения.

Схема отбора тепла, низкопотенциальный источник тепла, принцип прямого кипения

Отбор тепла от низкопотенциального источника тепла возможен по многим схемам. В соответствии с классификацией тепловых насосов, можно выделить две основные схемы отбора тепла от грунтовых вод:

– схемы, в которых тепло от источника отбирается через промежуточную рабочую среду;

– схемы, в которых вода отбирается из источника низкопотенциального тепла через теплообменник-испаритель теплового насоса.

Большинство фирм в Челябинской области, специализирующихся на тепловых насосах, и являющихся официальными представителями таких фирм как Viessmann, Stiebel Eltron, используют схему с промежуточным теплоносителем (рис. 1). Данная схема хорошо подходит для использования совместно со скважиной, даже если в ней нет воды. Пространство между теплообменником и скважиной в этом случае заполняется теплопроводящим раствором. Состав теплопроводящего раствора схож с составом бетона, но он более устойчив к размыванию, и имеет хорошую теплопроводность.

В данной схеме обязательно присутствуют следующие элементы:

– теплообменник испаритель;

– промежуточный теплоноситель (чаще всего используется этиленгликоль);

– насос для перекачки промежуточного теплоносителя;

– теплообменник «U» – образный, из пластиковой трубы.

Четыре перечисленных элемента обуславливают определенные недостатки, характерные для этой схемы. Практически любой теплообменный аппарат имеет определенный, температурный градиент, то есть минимальную разницу температур между нагревающим и нагреваемым теплоносителем, после превышения которой работа теплообменника начинает считаться эффективной. Данный параметр находится в пределах 5–7 градусов.

Это приводит к тому, что тепловому насосу придется работать в более широком диапазоне температур «источник – потребитель», что приводит к уменьшению коэффициента преобразования. Следовательно, каждый дополнительный теплообменник уменьшает коэффициент преобразования теплонасосоной установки (μ).

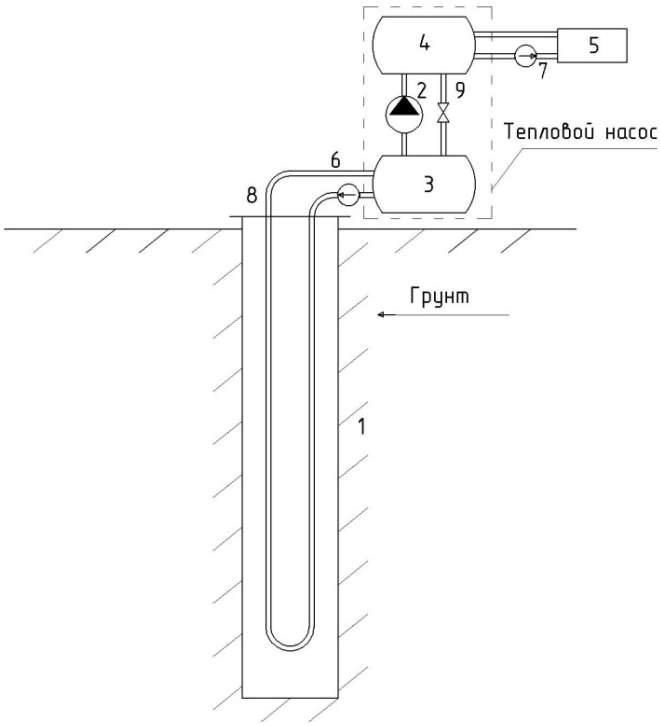


Рис. 1. Схема отбора низкопотенциального тепла с использованием промежуточного теплоносителя: 1 – скважина; 2 – компрессор; 3 – теплообменник-испаритель; 4 – теплообменник-конденсатор; 5 – потребитель (система отопления); 6 – насос, перекачивающий промежуточный теплоноситель; 7 – циркуляционный насос системы отопления; 8 – «U»-образный грунтовый теплообменник в скважине; 9 – терморегулирующий вентиль

Промежуточный теплоноситель имеет свои особенности. Так как промежуточный теплоноситель должен отбирать тепло от низкопотенциального источника, то рабочие диапазоны его температур находятся от минус 15^0С до нуля. Вещества, содержащиеся в промежуточном теплоносителе, позволяющие не замерзать при отрицательных температурах, обычно снижают удельную теплоемкость. Это приводит к тому, что в условиях Челябинской области придется перекачивать больше теплоносителя с меньшей теплоемкостью, чем в условиях более мягкого климата. Что, в свою очередь, приводит к дополнительным затратам энергии на перемещение теплоносителя. Перекачка промежуточного теплоносителя производится при помощи электрического насоса. А значит, необходимы дополнительные энергетические затраты, которые также снижают общий коэффициент преобразования теплового насоса.

Вторая схема может работать с отбором воды из скважины, так и с отбором тепла от поверхностных источников, таких как озера и реки (рис. 2).

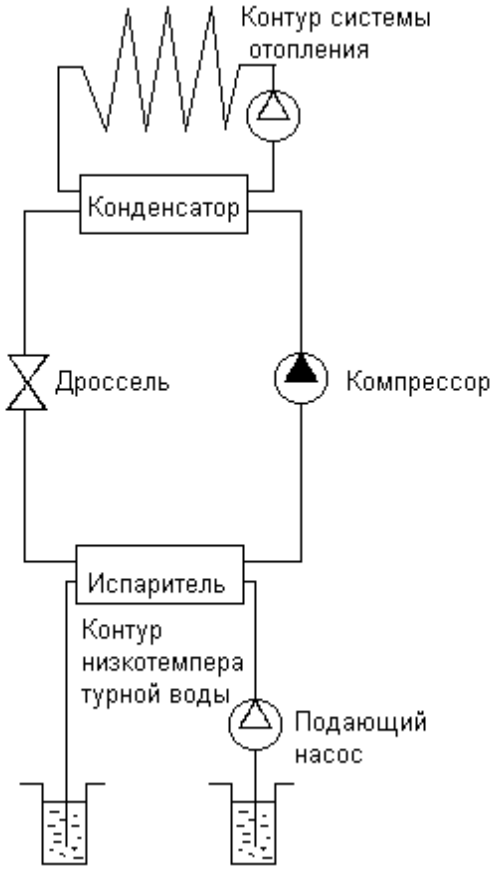


Рис. 2. Схема работы теплового насоса с перекачкой воды от источника низкопотенциальной энергии

Обладая определенной универсальностью, схема также имеет ряд недостатков, наличие которых ограничивает использование в условиях Челябинской области:

– необходима дополнительная энергия для перекачки воды из источника;

– при перекачке возникают значительные потери тепла.

– так как перекачивать приходится воду непосредственно из источника, то необходима предварительная отчистка воды, неочищенная вода может засорить теплообменник.

– наличие теплообменника обуславливает снижение коэффициента преобразования.

Перечисленные недостатки в значительной степени ограничивают применение данной схемы.

Проведя детальный анализ схем, и определив их основные недостатки, с учетом опыта реализации подобных схем в условиях Южного Урала предлагается более эффективная схема для наших климатических условий.

Предлагаемая схема использует принцип прямого кипения, т. е. теплообменником-испарителем является непосредственно теплообменник-труба, погруженный в скважину (рис. 3).

Особенностью данной схемы является то, что кипение хладагента происходит непосредственно в скважине, т. е. теплообменник-испаритель и теплообменник в скважине – это один и тот же элемент.

При работе теплового насоса кипение в испарителе всего на 2–3 °С ниже температуры источника низкопотенциального тепла. При температуре источника, даже когда компрессор не работает, происходит постепенный прогрев теплообменника, и поэтому практически отсутствует задержка выхода установки на рабочий режим. Также из-за отсутствия промежуточного теплообменника коэффициент преобразования μ будет выше.

К преимуществам можно отнести тот фактор, что состояние (загрязнение) источника не влияет на эффективность схемы. Кроме того, схема может работать как при наличии воды в скважине, так и при ее отсутствии.

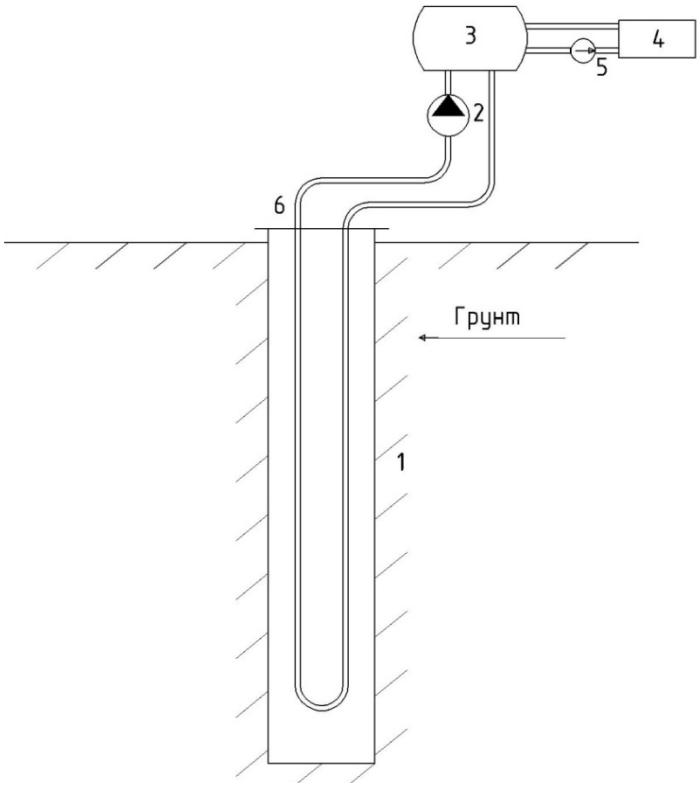


Рис. 3. Схема отбора низкопотенциального тепла с использованием принципа прямого кипения: 1 – скважина; 2 – компрессор; 3 – теплообменник-конденсатор; 4 – потребитель (система отопления); 5 – циркуляционный насос системы отопления; 6 – «U»-образный грунтовый теплообменник в скважине; 7 – терморегулирующий вентиль

В дальнейшем необходимо разработать имитационную модель работы предлагаемой схемы и провести ее экспериментальные испытания для оценки возможности применения в условиях Южного Урала и оценки эффективности работы теплонасосной установки.

УДК 697.329 :628.165 + 628.165

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА И СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ

И.Р. Рахматулин

В статье приводятся результаты исследования по возможности использования солнечного коллектора и солнечного концентратора для опреснения воды.

Ключевые слова: солнечный коллектор, солнечный концентратор, возобновляемые источники энергии, лабораторная опреснительная установка.

Тенденция развития мировой энергетики показывает, что в будущем работа многих технических устройств будет осуществляться за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Уже сегодня при помощи ВИЭ человечество получает электрическую и тепловую энергию, готовит пищу на солнечных кухнях и передвигается на автомобилях использующих биотопливо. Одним из примеров использования ВИЭ является опреснение соленой и очистка загрязненной воды с помощью солнца. Для удовлетворения жестким требованиям эффективности к опреснительным установкам, при их проектировании, стоит рассматривать все возможные способы преобразования солнечной энергии в тепловую энергию.

В данной статье приведен сравнительный анализ использования солнечного коллектора и солнечного концентратора в качестве нагревательных элементов в лабораторной опреснительной установке [1].

Интенсивность солнечного излучения приходящего на 1 м^2 в течение дня для каждого месяца в Челябинской области, рассчитана по формуле [2]:

$$H = 1{,}36 \cdot S_d \cdot \left(a + b \cdot \frac{S_d}{S_0}\right),\ \text{кВт/ м}^2, \quad (1)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, S_d – действительная продолжительность солнечного сияния, ч, S_o – возможная продолжительность солнечного сияния, ч, R – отношение среднемесячных дневных приходов суммарной солнечной энергии на наклонную и горизонтальную поверхности.

Используем полученные данные, для расчета производительности солнечного коллектора и солнечного концентратора.

Производительность вакуумного солнечного коллектора рассчитана по формуле [2]:

$$S_{yd.i} = F_R(H_i \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot \mathrm{S}(T_{\text{вх}} - T_0) \cdot 10^{-3}),\ \text{кВт·ч/м}^2, \quad (2)$$

где F_R – коэффициент переноса тепла от коллектора к жидкости (0,92 – для вакуумного коллектора), τ – коэффициент проникновения солнечной радиации, α – коэффициент поглощения солнечной радиации, ($\tau \cdot \alpha = 0{,}94$ – для

вакуумного коллектора), U_L – коэффициент тепловых потерь (0,6 Вт/м^2·К – для вакуумного коллектора), T_0 – среднемесячная температура окружающего воздуха, $T_{вх}$ – температура на входе в коллектор, К.

Полученные результаты представлены на рис. 1.

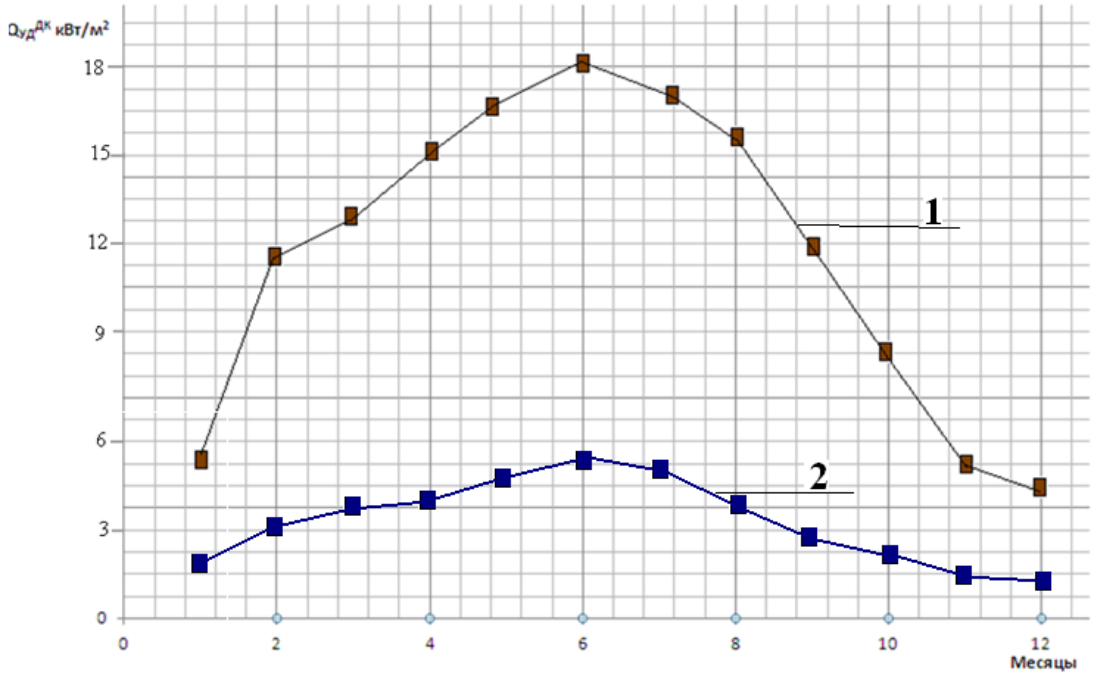


Рис. 1. Зависимость выработки тепловой энергии солнечного концентратора (1) и вакуумного солнечного коллектора (2) от времени года

Для проведения сравнительных исследований по эффективности использования солнечного излучения был выбран чашеобразный концентратор с w-образным сечением, который обладает высокими техническими характеристиками [3].

Схема солнечного концентратора, представлена на рис. 2.

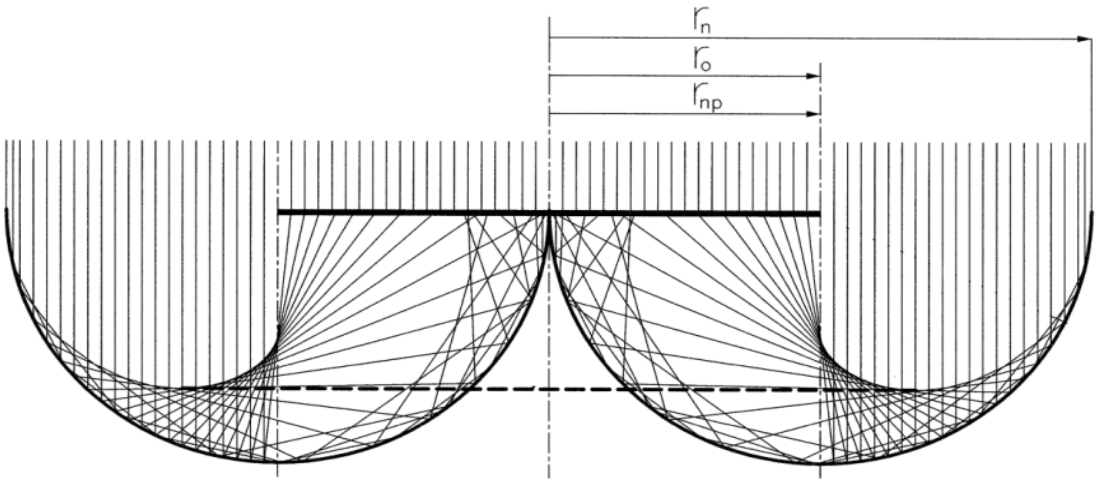


Рис. 2. Схема солнечного концентратора: r_0 – радиус до оси полуокружности, $r_{пр}$ – радиус приемника, r_n – радиус большей окружности концентратора

Концентратор при помощи следящего механизма, фокусирует солнечные лучи на приемник, которые передает тепловую энергию на теплообменник.

Тепловая мощность солнечного концентратора рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$Q = a \cdot H \cdot \pi[(r_n{}^2 - r_{n-1}{}^2) \cdot p^n + (r_{n-1}{}^2 - r_{n-2}{}^2) \cdot p^{n-1} + \\ +(r_{n-2}{}^2 - r_{n-3}{}^2) \cdot p^{n-2} + \cdots + (r_1{}^2 - r_0{}^2) \cdot p^1 + \delta \cdot r_{np}{}^2 \cdot p^0], \quad (3)$$

где a – коэффициент поглощения солнечной радиации приемником, H – интенсивность солнечного излучения, r_n – радиус большей окружности концентратора (апертура), r_{n-1} – внутренний радиус периферийного кольца и наружный следующего за ним, p^n – коэффициент отражения концентратора в степени n, r_0 – радиус до оси полуокружности, $r_{\text{пр}}$ – радиус приемника, δ – коэффициент, учитывающий рассеянную радиацию, падающей на лицевую сторону приемника.

Для концентратора с радиусом апертуры r_n = 2,5 м и приемником с $r_{\text{пр}}$ = 1,25 м, принимая a = 0,9, δ = 1,25, p = 0,9, получено что [3]:

$$Q = 3{,}72 \cdot H, \text{ кВт·ч/м}^2, \quad (4)$$

Используя значения величины H, была рассчитана производительность солнечного концентратора для каждого месяца.

Для сравнения эффективности работы солнечного коллектора и концентратора показатели их производительности представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, производительность солнечного концентратора превосходит производительность солнечного коллектора, однако работа солнечного концентратора зависит от надежности системы слежения, в то время как солнечные коллекторы могут работать без нее. Наличие системы слежения и приводных механизмов для регулирования положения плоскости солнечного концентратора относительно азимута и зенита, приводит к увеличению стоимости солнечных концентраторов и габаритных размеров.

Для анализа производительности опреснителя при использовании в качестве нагревателей солнечных элементов, воспользуемся результатами испытаний лабораторной опреснительной установки [1].

Производительность лабораторной опреснительной установки, при использовании, в качестве нагревателя солнечного коллектора и концентратора показана на рис. 3.

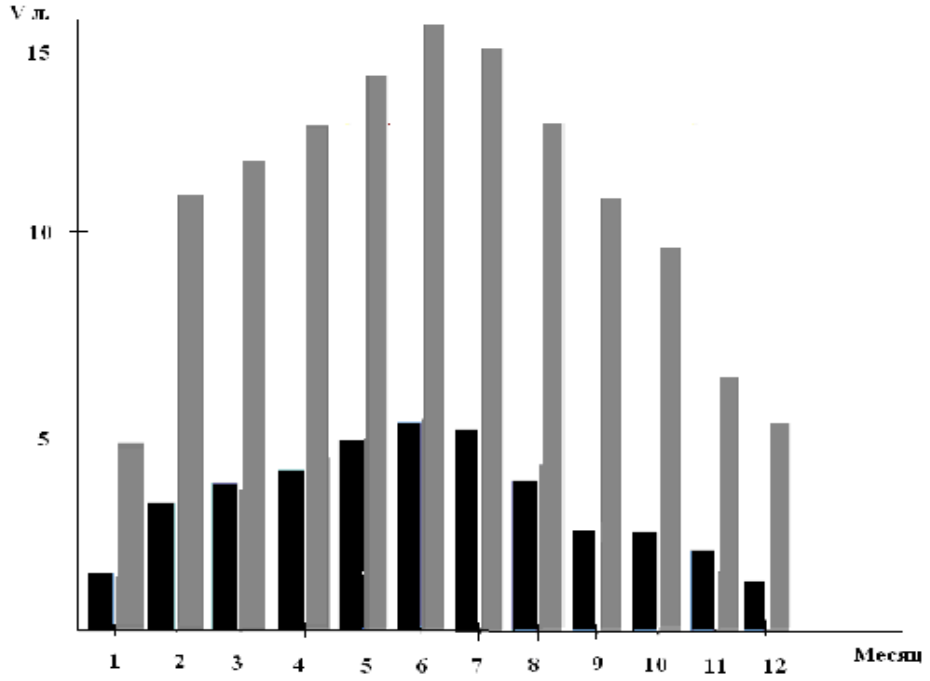


Рис. 3. Производительность лабораторной опреснительной установки:
■ – при использовании коллектора, ■ – при использовании концентратора

Исходя из полученных показателей, представленных на рис. 3, следует, что производительность опреснителя при использовании солнечного концентратора в среднем в три раза выше, чем при использовании коллектора. Но вследствие имеющихся недостатков, солнечный концентратор рекомендуется использовать при больших объемах производства очищенной воды, в то время как солнечные коллекторы, рекомендуется применять при индивидуальном использовании их в опреснительной установке.

Библиографический список

1. Кирпичникова, И.М. Экспериментальные исследования лабораторного опреснителя / И.М Кирпичникова, И.Р. Рахматулин // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – январь. – С. 40–43.

2. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, Ю.П. Ильин. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2000. – 203 с.

3. Стребков, Д.С. Расчет оптического КПД модулей с двусторонними фотоэлементами и концентраторами солнечной энергии / Д.С. Стребков, С.Н. Трушевский, И.В. Митина // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. междунар. науч.-техн. конф. – 2008. – Т. 4. – С. 203–210.

УДК 621.313.33; 62 – 83:621.313.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМАХ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ

В.И. Смолин, И.Г. Топольская, В.А. Калмаков

Рассмотрены механические характеристики асинхронного двигателя в режиме стабилизации основного магнитного потока. Управление в диапазоне малых скоростей выполнено регулированием синхронной частоты, а стабилизация магнитного потока – амплитудным регулированием напряжения. Показано, что рассмотренный алгоритм управления обеспечивает одинаковую перегрузочную способность и постоянную жесткость механических характеристик до нулевой частоты включительно. Динамические свойства остаются практически неизменными во всем диапазоне регулирования.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, амплитудно-частотное регулирование, механические характеристики, динамические свойства.

Технические характеристики современных преобразователей частоты обеспечивают возможность работы трехфазного асинхронного двигателя (АД) в зоне малых (ползучих) скоростей, в режимах следящего и моментного привода. Такое применение асинхронной машины сдерживается недостаточным уровнем исследований статических и динамических характеристик АД в низкочастотном скоростном диапазоне [1]. Наиболее эффективное управление моментом АД в зоне малых скоростей связывают с режимом стабилизации основного магнитного потока [2, 3]. Реализация этого метода считается затруднительной в связи с неразработанностью алгоритмов вычисления тока I_0 ветви намагничивания в наблюдателе состояния [4]. В данной статье эта задача решается на качественно новой основе – теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей [5]. Методы определения тока I_0 рассмотрены в [6].

Согласно этой теории мгновенную сумму энергий трех фаз АД можно представить обобщенным энергопотоком, количественные характеристики которого выражаются эквивалентными (обобщенными) токами и напряжениями в виде аналоговых функции времени, как в машинах постоянного тока. При этом взаимосвязь эквивалентных токов и напряжений остается векторной. Уравнения свертки мгновенных токов и напряжений фаз в обобщенные токи и напряжения позволяют получить аналоговую энергетическую модель АД [7], показанную на рис. 1.

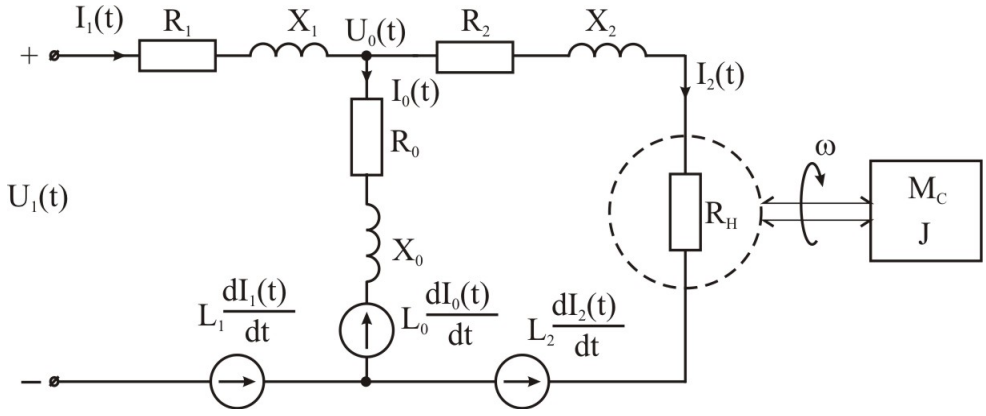


Рис. 1. Аналоговая энергетическая модель трехфазного АД (модель ST2):
$s(t)=\left(\omega_0(t)-\omega(t)\right)/\omega_0(t)$, $X_1=X_{1н}\cdot\left(\omega_0(t)/\omega_{0н}\right)$, $X_0=X_{0н}\cdot\left(\omega_0(t)/\omega_{0н}\right)$,
$X_2=X_{2н}\cdot\left(\omega_0(t)/\omega_{0н}\right)$, $R_0=R_{0н}\cdot\left(\omega_0(t)/\omega_{0н}\right)^2\cdot\left(I_0(t)/I_{0н}\right)^2$,
$R_н=R_2\cdot\left(\left(1-s(t)\right)/s(t)\right)$, индексы приведения параметров
ротора к статору в схеме и далее по тексту опущены

Система уравнений электрического равновесия энергетической модели ST2 имеет в общем случае следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U_1(t)-L_1\cdot I_1'(t)-L_0\cdot I_0'(t) \\ L_0\cdot I_0'(t)-L_2\cdot I_2'(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Z_1+Z_0 & -Z_0 \\ -Z_0 & Z_0+Z_2+R_н \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где $Z_0=R_0+jX_0$, $Z_1=R_1+jX_1$, $Z_2=R_2+jX_2$, производные токов отмечены штрихами.

Взаимосвязь мгновенных фазных токов и напряжений с обобщенными аналогами покажем на примере напряжения

$$U_1^2(t)=u_a^2+u_b^2+u_c^2=1{,}5\cdot U_{1m}^2(t).$$

Переход от (1) к балансу активной и реактивной мощности позволяет получить уравнение обобщенного энергопотока:

$$\begin{bmatrix} U_1(t)\cdot I_1(t)\cdot\cos\varphi_1(t)-I_1^2(t)\cdot R_1-\sum P_{Li}(t) \\ U_1(t)\cdot I_1(t)\cdot\sin\varphi_1(t)-I_1^2(t)\cdot X_1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_0 & R_2/s(t) \\ X_0 & X_2 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} I_0^2(t) \\ I_2^2(t) \end{bmatrix},$$

$$I_2^2(t)\cdot R_2=\left(\omega_0(t)-\omega(t)\right)\cdot\left(M_c(t)+J\frac{d\omega(t)}{dt}\right), \qquad (2)$$

$$\sum P_{Li}(t)=L_1\cdot I_1(t)\cdot I_1'(t)+L_2\cdot I_2(t)\cdot I_2'(t)+L_0\cdot I_0(t)\cdot I_0'(t).$$

Вышеизложенные теоретические принципы положены в основу решения задачи исследования статических и динамических характеристик АД в низкочастотном скоростном диапазоне.

Выберем для исследования асинхронный двигатель конкретной серии, например, 4А, характеристики которого представлены в технической до-

кументации наиболее полно. Этих данных достаточно для расчета по уравнениям (2) обобщенных токов $I_{0н}$ и $I_{2н}$ в номинальном установившемся режиме АД.

Полагая ток $I_{0н}$ = const, рассчитаем механические характеристики АД при амплитудном управлении для различных частот ω_{0i} = const в режимах малых скоростей. Задачу решим численным методом по уравнениям (1). Результаты таких расчетов представлены графически на рис. 2. Амплитудно-частотное регулирование момента АД выполнено по алгоритму $M = f(\omega_0,\ U_1)$, $I_{0н} = \text{const}$. Управление частотой вращения обеспечивается регулированием синхронной частоты ω_0, а стабилизация тока $I_{0н}$ – амплитудным регулированием напряжения U_1.

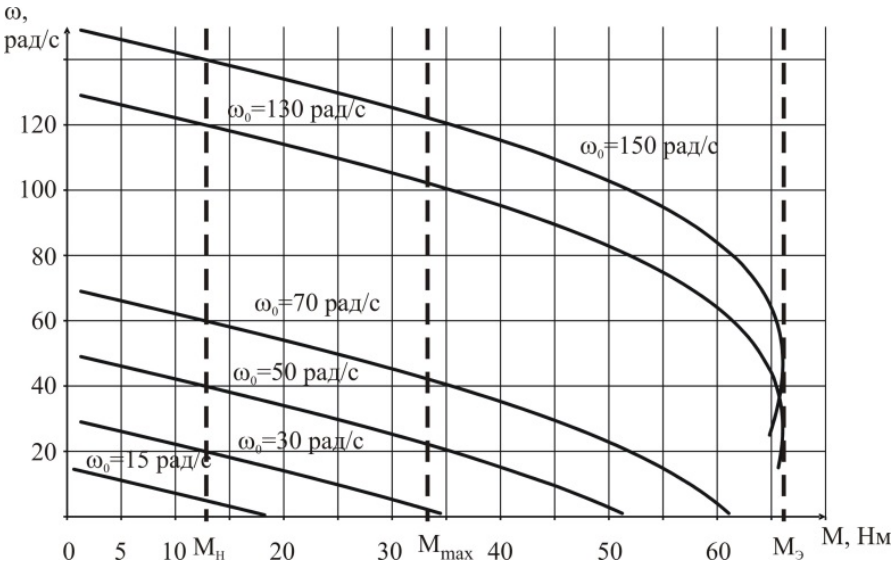


Рис. 2. Механические характеристики АД 4А100S2У3
при амплитудно-частотном управлении $M = f(\omega_0, U_1)$, $I_{0н} = \text{const}$

На характеристиках отмечены моменты: номинальный $M_н$, максимальный M_{max} и экстремальный $M_э$. Рассмотренный алгоритм управления обеспечивает большую перегрузочную способность АД ($M_э / M_н = \text{const}$), одинаковую жесткость механических характеристик в первой зоне регулирования до нулевой частоты включительно. Диапазон регулирования по предельно допустимому току $I_{1н} = \text{const}$ нагрева обмоток АД в длительных режимах отмечен пунктирной линией и соответствует условию $M \le M_н$. Динамические характеристики АД определяются электрической $T_э$ и электромеханической $T_м$ постоянными времени:

$$T_э = \frac{L_1}{R_1} + \frac{s \cdot L_2}{R_2},\ T_м = J\frac{\Delta\omega}{\Delta M}, \qquad (3)$$

где J – приведенный момент инерции ротора и нагрузки, s – скольжение ротора. Их анализ показывает, что динамические свойства АД остаются практически неизменными в широком диапазоне регулирования. Этот вы-

вод не относится к другим методам управления АД. На рис. 3 приведены сравнительные характеристики АД, подтверждающие эффективность исследуемого метода управления.

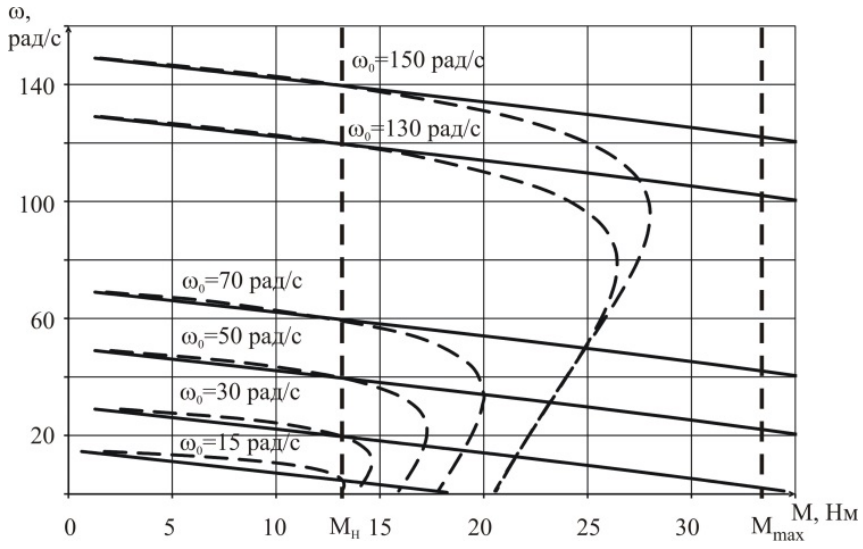


Рис. 3. Механические характеристики АД 4А100S2У3 в режимах управления: $M = f(\omega_0, U_1)$, $I_{0н} = 10{,}1$ А = const (сплошные линии) и U_1/ω_0 = const (пунктирные линии)

Библиографический список

1. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издат. центр «Академия», 2004. – 256 с.

2. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 216 с.

3. Эпштейн, И.И. Автоматизированный привод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.

4. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. – 136 с.

5. Смолин, В.И. Основы теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – № 1(13).

6. Смолин, В.И. Энергетический метод мониторинга частоты вращения и нагрузки асинхронного привода / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Сб. науч. тр. Sworld: материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013» (19–30 марта 2013 г.). – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – Вып. 1, Т. 5. – С. 80–86.

7. Смолин, В.И. Энергетические основы мониторинга нагрузки и параметров состояния трехфазных электромеханических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская // Актуальные вопросы науки: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (25.01.2013). – М.: Изд-во «Спутник+», 2013. – С. 70–75.

УДК 004.383.4

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМОЙ СИСТЕМЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ Scilab

Д.В. Топольский, И.Г. Топольская, Н.Д. Топольский

Аннотация. Статья описывает опыт применения пакета Scilab в научных исследованиях и образовании.

Ключевые слова: Scilab, моделирование, свободное программное обеспечение.

Моделирование сочетает в себе возможности теории и практики и является одним из самых распространенных методов научных исследований. Существует целый ряд систем компьютерной математики, позволяющих осуществлять моделирование – Mathlab, Mathcad, Maple, Mathematica и др. Все они имеют широкие возможности, но при привлечении к научным исследованиям студентов, учащихся, аспирантов существенным недостатком этих пакетов является покупка лицензии на их использование. Часто это затрудняет и удорожает научные исследования. Поэтому применение для этих целей свободного программного обеспечения (СПО) придаёт инновационную направленность этим исследованиям. Разработка методологии моделирования с применением СПО является важной научной задачей, имеющей большое практическое значение и актуальность.

Свободно распространяемая система компьютерной математики Scilab предназначена для выполнения инженерных и научных вычислений. По своим возможностям пакет Scilab сопоставим с известным математическим пакетом Mathcad, а по своему интерфейсу похож на пакет Matlab. Однако при этом пакет Scilab – свободно распространяемая программа.

Одним из видов задач, решаемых в Scilab являются задачи оптимизации. Оптимизацией называют процесс выбора наилучшего варианта из всех возможных.

В данном случае, рассматривается задача целочисленного программирования. Целочисленное программирование – раздел математического программирования, в котором на все или некоторые переменные дополнительно накладываются ограничение целочисленности. Простейший метод решения задачи целочисленного программирования – сведение ее к задаче линейного программирования с проверкой результата на целочисленность. В свою очередь, линейное программирование – область математического программирования, посвященная теории и методам решения экстремальных задач, характеризующихся линейной зависимостью между переменными.

Постановка задачи: Найти значения переменных x_1, x_2, x_3, x_4, при которых функция цели $W = x_1 + x_2 + 3x_3 - x_4$ достигает своего максимального значения, и удовлетворяются ограничения:

$$\begin{cases} x_1 - 5x_2 + 4x_3 \le 5; \\ x_1 - 2x_2 - 3x_3 \le 4; \\ x_1 + 6x_2 + 5x_3 \le 4; \\ x_2 + x_3 \le 1. \end{cases}$$

Решение: Для решения задач линейного программирования в Scilab предназначена функция *linpro* следующей структуры:

$$[x, kl, f] = \text{linpro}(c, A, b[, ci, cs][, k][, x0]). \quad (1)$$

Здесь *c* – массив (вектор-столбец) коэффициентов при неизвестных функции цели, длина вектора *n* совпадает с количеством неизвестных *x*;

A – матрица при неизвестных из левой части системы ограничений, количество строк матрицы равно количеству ограничений *m*, а количество столбцов совпадает с количеством неизвестных *n*;

b – массив (вектор-столбец), содержащий свободные члены системы ограничений, длина вектора *m*;

ci – массив (вектор-столбец) размерности *n*, содержащий нижнюю границу переменных ($ci_j \le x_j$); если таковая отсутствует, указывают [];

cs – массив (вектор-столбец) длиной *n*, содержит верхнюю границу переменных ($cs_j \ge x_j$); если таковая отсутствует, указывают [];

k – целочисленная переменная, используется, если в систему ограничений кроме неравенств входят и равенства, в матрице они будут находиться в *k* первых строках, оставшиеся *l* строк займут неравенства, т. е. $m = k+l$;

x0 – вектор-столбец начальных приближений длиной *n*.

Функция *linpro* возвращает массив неизвестных *x*, минимальное значение функции *f* и массив множителей Лагранжа *kl*.

При решении данной задачи возникают проблемы именно с реализацией функции *linpro*. Изучение состояния вопроса показало, что для использования этой функции в версии программы Scilab 5.1.1 нужно дополнительное расширение – *quapro-1.0*:

Листинг 1 Правильная загрузка расширения quapro-1.0

```
Startup execution:
loading initial environment
Start quapro toolbox
Load macros
Load gateways
Load help
Выполнение завершено.
```

Программа готова к решению поставленной задачи. Приступим к реализации исходной задачи.

Листинг 2 Решение задачи

```
-->C= [1,-5,4,0;
-->       1,-2,-3,0;
-->       1,6,5,0;
-->       0,1,1,0];
-->b=[5;4;4;1];
-->p=[1;1;3;-1];
-->ci=[0;0;0;0];
-->cs=[0;0;0;0];
-->[x,lagr,f]=linpro(p,C,b,ci,cs)
```

Листинг 3 Результаты решения задачи

```
 f  =
    0.
 lagr  =
  - 1.
  - 1.
  - 3.
    1.
    0.
    0.
    0.
    0.
 x  =
    0.
    0.
    0.
    0.
```

Следовательно, что только при всех нулевых значениях *x* функция цели принимает максимальное значение, удовлетворяя при этом заданным условиям.

В ходе апробации пакета Scilab в учебном процессе с целью выполнения моделирования и расчета электротехнических систем был решен ряд задач. Получены расчетные решения в Scilab для электрических цепей постоянного тока с одним источником питания постоянного тока, сложных электрических цепей постоянного тока, однофазных цепей синусоидального тока, а также рассчитаны и построены механические характеристики машин постоянного тока. Все расчетные решения, полученные для Scilab, были проанализированы в сравнении с аналогичными решениями, полученными для Mathcad. Результаты оказались идентичными.

При изучении математического моделирования, студентами были разработаны ряд моделей возобновляемых источников энергии: модели выхода свалочного биогаза с нового челябинского полигона твердых бытовых

отходов (ТБО) по уравнению кинетики реакции газообразования первого порядка и по модели Табасарана–Ретенбергера, модели активной и реактивной гидравлической турбины и др. В Листинге 4 приведена модель Табасарана–Ретенбергера.

Листинг 4. Решение задачи по определению годового выхода свалочного биогаза с нового полигона твердых бытовых отходов

```
//Содержание биоразлагаемого органического углерода (г/т отходов) можно представить в виде суммы четырех составляющих, которые определяются из морфологического состава ТБО:
A=25.8
B=26.2
C=34.6
D=10
CO=A+B+C+D
//где A – содержание в отходах бумаги и текстиля, %; B – содержание в отходах садово-парковых и других непищевых отходов, %; C – содержание в отходах пищевых отходов, %; D – содержание в отходах древесных отходов и другое, %.
//Потенциал генерации свалочного биогаза (куб. м.) рассчитаем по следующей формуле:
T=30
GO=1.868*CO*(0.014*T+0.28)                                    //
//где T – температура в толще полигона ТБО, град.
//Количество выделившегося свалочного биогаза за один год (куб. м.) на полигоне ТБО определяется по формуле Табасарана–Ретенбергера:
t=1
k=0.06
G=GO*(10^3)*[1-(10^(-k*t))]                                    //
// где t – время с открытия полигона, год; k – константа разложения, 1/год.
```

Полученные результаты построения математических моделей в SciLab позволяют говорить о возможности использования СПО в научных исследованиях. Это в свою очередь во многом является результатом предпринимаемых в России мер по разработке и внедрению в государственные организации СПО, а также государственной политики, относящейся к разработке программ для ЭВМ для государственных и муниципальных нужд, направленной на повышение эффективности, унификацию и стандартизацию информационных технологий.

УДК 621.317.001.24 +621.316.7

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЖИЛОГО ДОМА С ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЕМ

А.Ю. Усков

При электрическом отоплении и горячем водоснабжении жилых домов за счет управления моментами включений электроотопительных приборов становится возможным сглаживание графиков общего электропотребления. В результате проведенного эксперимента фиксировались мгновенные значения потребляемого тока по общему кабельному вводу жилого дома с системой электроотопления. Таким образом, были получены средние суточные графики зависимостей нагрузки жилого дома. Было подтверждено, что максимальное изменение потребляемой мощности линии электроснабжения дома в течение суток в зимний период составляет не более 18 %.

Ключевые слова: системы электроотопления, эффективность регулирования, выравнивание графика нагрузки.

График электрической нагрузки – это изменение электрической нагрузки во времени, представленное в прямоугольной системе координат. В каждый момент времени величина нагрузки является случайной, причем закон ее распределения изменяется во времени. Электропотребление жилых домов в течение суток подвержено резким изменениям в достаточно короткие промежутки времени (часы, минуты), что влечет за собой необходимость выбора мощности питающей станции по максимуму нагрузки в самое холодное время года.

При электрическом отоплении и горячем водоснабжении жилых домов, учитывая большую тепловую инерционность объектов регулирования, можно за счет управления моментами включений электроотопительных приборов сделать графики электропотребления более равномерными [1, 2].

Увеличение расчетной мощности питающей сети вызвано необходимостью обеспечения одновременной работы электронагревателей, которые включены на полную мощность, и бытовых электроприборов в помещении. Теплопоступление от потребителей электроэнергии связано с потреблением активной составляющей мощности из электросети. Измерение активной мощности позволяет определить максимально возможные теплопоступления от прочих потребителей электроэнергии и заблаговременно снизить мощность электрообогревателей. Таким образом, снижение мощности электрообогревателей помещения при увеличении активной мощности прочих потребителей электроэнергии и последующая корректировка регу-

лятором температуры мощности электрообогревателей помещения, позволяют не только поддерживать заданный температурный режим, но и снизить величину максимума токовой нагрузки на питающую сеть.

Теоретически, выравнивание графика нагрузки на вводе в жилой дом при электрическом отоплении и горячем водоснабжении с использованием подобной системы управления является эффективной мерой, позволяющей снизить мощность питающей трансформаторной подстанции.

В качестве примера рассмотрим семнадцатиэтажный 66-квартирный жилой дом, электроснабжение которого осуществляется от подстанции с двумя трансформаторами и производится по двум линиям с автоматическим взаимным резервированием. При отказе одной из линий все потребители электроэнергии переключаются на рабочую линию электроснабжения. Каждая линия рассчитана с учетом допустимых перегрузок в аварийном режиме и защищена автоматическими выключателями. Для построения экспериментальных зависимостей к одной из линий электроснабжения дома был подключен микропроцессорный регистратор «Селен РЭП-10-64». В течение 15 суток регистратор непрерывно измерял и поминутно фиксировал максимальное и минимальное напряжение, максимальный и минимальный ток, а также вычислял средние значения напряжения и тока в каждой фазе. В дальнейшем полученные данные были преобразованы в графические зависимости. К рассматриваемой линии электроснабжения подключены: гаражи, магазин, офисное помещение, лифт и 35 квартир.

Напряжение питающей сети в линии электроснабжения в период проведения эксперимента (13 декабря 2012 года – 27 декабря 2012 года) было стабильно и составляло 225 ± 5 В, поэтому в дальнейших расчетах примем среднее значение напряжения равным $U_{СР}$ = 225 В.

Таблица 1

Расчетные значения нагрузок

Параметр	Базовый вариант, кВт	При регулировании максимума нагрузки, кВт	Снижение расчетных нагрузок, %
Питающая линия	494,50	437,70	11,49

В работе [7] был произведен расчет нагрузки питающей линии экспериментального семнадцатиэтажного жилого дома с единым энергетическим вводом, результаты которого приведены в табл. 1. Данные, представленные в таблице, отражают суммарное потребление жилого дома по линиям электроснабжения 1 и 2. Мощность, потребляемая рассматриваемым жилым домом по линии электроснабжения 2, составляет около 75 % от мощности, потребляемой по линии электроснабжения 1 – учтем это далее в расчетах (4).

На графике зависимости средних значений потребляемого тока от времени суток за период эксперимента (рис. 1) отчетливо видны получасовые максимумы нагрузки в периоды времени с 11:30 до 12:00 и с 21:00 до 21:30, что полностью соответствует теоретическим данным, приведенным в работе [5]. Потребляемая мощность равна:

$$P_{СР1} = I_{СР1} \cdot U_{СР} = 1057{,}25\ А \cdot 225\ В = 237{,}88\ кВт, \quad (1)$$

$$P_{МИН1} = I_{МИН1} \cdot U_{СР} = 965{,}10\ А \cdot 225\ В = 217{,}15\ кВт, \quad (2)$$

$$P_{МАКС1} = I_{МАКС1} \cdot U_{СР} = 1163{,}25\ А \cdot 225\ В = 261{,}73\ кВт. \quad (3)$$

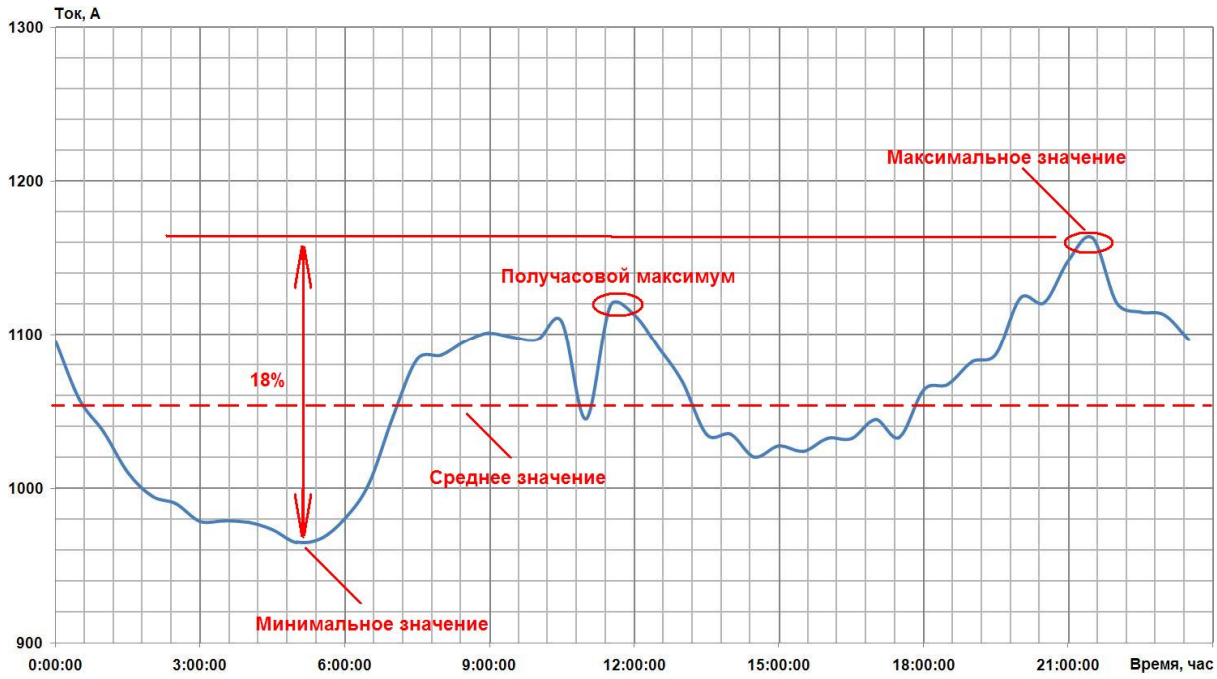


Рис. 1. Зависимость потребления тока от времени суток

Из выражений (2), (3) следует, что максимальное изменение потребляемой мощности по первой линии электроснабжения в течение суток в зимний период составляет не более 18 %. Данный показатель существенно превосходит аналогичный показатель для жилых домов, в которых не применяется метод регулирования нагрузки, достигающий 80 % (по данным [5]). Идеального выравнивания графика нагрузки жилого дома с электроотоплением добиться не удается по причине неравномерного спроса на потребление электроэнергии в течение суток (см. рис. 1). Тем не менее, суммарная максимальная мощность, потребляемая жилым домом по двум линиям электроснабжения:

$$P_{МАКС} = P_{МАКС1} + P_{МАКС2} = 1{,}75 \cdot P_{МАКС1} = 458{,}03\ кВт. \quad (4)$$

Несмотря на то, что данные полученные в результате эксперимента (4), незначительно отличаются от расчетных значений (таблица 2), сохраняется общая тенденция снижения расчетного значения мощности питающей сети при регулировании максимума нагрузки.

Таблица 2

Экспериментальные значения нагрузок

Параметр	Базовый вариант, кВт	При регулировании максимума нагрузки, кВт	Снижение расчетных нагрузок, %
Питающая линия	494,50	458,03	7,38

Описанный способ регулирования максимума нагрузки для жилых домов с установленными системами электроотопления и единым энергетическим вводом является эффективным [8], что подтверждают данные эксперимента. Расхождение экспериментальных данных с данными теоретических расчетов составило менее 5 %.

Библиографический список

1. Пат. 2287886 Российская Федерация, МПК7 H 02 J 13/00, G 05 D 23/19 Способ управления электронагревательным устройством / Л.Ф. Файда, С.А. Соболев, Е.Л. Файда, В.В. Варганов. – № 2005155665; заявл. 23.05.05, опубл. 20.11.06, Бюл. № 32.

2. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8, № 20 (92). – С. 3–9.

3. Пат. 2259022 Российская Федерация, МПК7 H 05 B 1/02, H 02 J 13/00, G 05 D 23/19. Способ управления группой электронагревательных устройств / Л.Ф. Файда, С.А. Соболев, Е.Л. Файда. – № 2004107224, заявл. 10.03.04, опубл. 20.08.05, Бюл. № 23.

4. Пат. 2249287 Российская Федерация, МПК7 H 02 J 13/00, G 05 D 23/19. Способ управления группой электронагревательных устройств / Л.Ф. Файда, С.А. Соболев, Е.Л. Файда. – № 2003115996, заявл. 28.05.03, опубл. 20.08.03, Бюл. № 9.

5. Тульчин, И.К. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И.К. Тульчин, Г.И. Нудлер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.

6. Свод правил по проектированию и строительству СП 31-110–2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий (одобрен и рекомендован к применению постановлением Госстроя РФ от 26 ноября 2003 г. № 194).

7. Файда, Е.Л. Повышение эффективности электротехнических комплексов жилых зданий с единым энергетическим вводом: автореф. дис. … канд. техн. наук. – Челябинск, 2007. – 18 с.

8. Повышение качества регулирования систем электроотопления / А.Ю. Усков, И.М. Кирпичникова, Е.Л. Файда, Т.Ю. Никонова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 87–89.

УДК 621.31.001.24 + 621.316.7

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МИКРОСЕТЯХ

Л.М. Четошникова, С.П. Петров

Одно из ключевых свойств умной микросети заключается в способности регулировать спрос во времени таким образом, чтобы он соответствовал предложению. Следствием этого будет улучшение использования первичных энергоресурсов, снижение доли резервных источников энергии в системе электроснабжения и губительного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: микросеть, график нагрузок, регулирование мощности.

Неравномерность потребления электрической энергии во времени серьезно сказывается на работе энергосистемы, вызывает увеличение стоимости ее производства и передач, что в свою очередь, приводит к росту затрат потребителей энергии. В настоящее время энергосистема обязывает предприятия снижать нагрузку в часы максимума. Это приводит к определенным трудностям при выполнении производственных планов и снижению технико-экономических показателей деятельности предприятия.

Теоретически добиться усреднения спроса можно за счет мотивации частных потребителей регулировать спрос на электроэнергию с последующим их поощрением. Для этого необходимо стимулировать потребителей снижать или увеличивать энергопотребление в соответствии с предложением в то или иное время суток.

Проведем анализ на основе типовых графиков и данных о потреблении электроэнергии обычными бытовыми приборами. В основном эти приборы имеют небольшую мощность и не все они могут быть перепрограммированы в соответствии с текущим спросом. Например, сложно представить, что кто-нибудь, нагревая пищу в микроволновой печи, должен будет отложить данное занятие до полуночи, пока спрос не снизится или ожидать, что кто-нибудь отложит использование кондиционеров воздуха на ночные часы в жаркий летний день. Однако, из этих же данных видно, что некоторые мощные потребители, например, посудомоечные машины, нагреватели, стиральные машины и т. д., могут перепрограммироваться, чтобы включаться во время непиковых часов, например, после полуночи или ранним утром, когда общий спрос низкий.

После того, как установлены приборы, подлежащие перепрограммированию, делается следующий шаг – определяется спрос на уровне потребителя (узлы нагрузки), уровне распределительной системы (шины) и агрегационного спроса. Это потребует от потребителя установки специальной аппаратуры для получения непрерывной информации о текущем спросе.

Распределенная интеллектуальная система призвана нормализовать распределение нагрузки среди потребителей. Узлы, участвующие в процессе выравнивания мощности, взаимодействуют с изменением своей нагрузки и друг с другом с целью обеспечить передачу мощности от узла с высокой нагрузкой к узлу с низкой нагрузкой. Результатом такого перемещения является то, что узлы нормализуют свои нагрузки, создавая таким образом устойчивую систему [1].

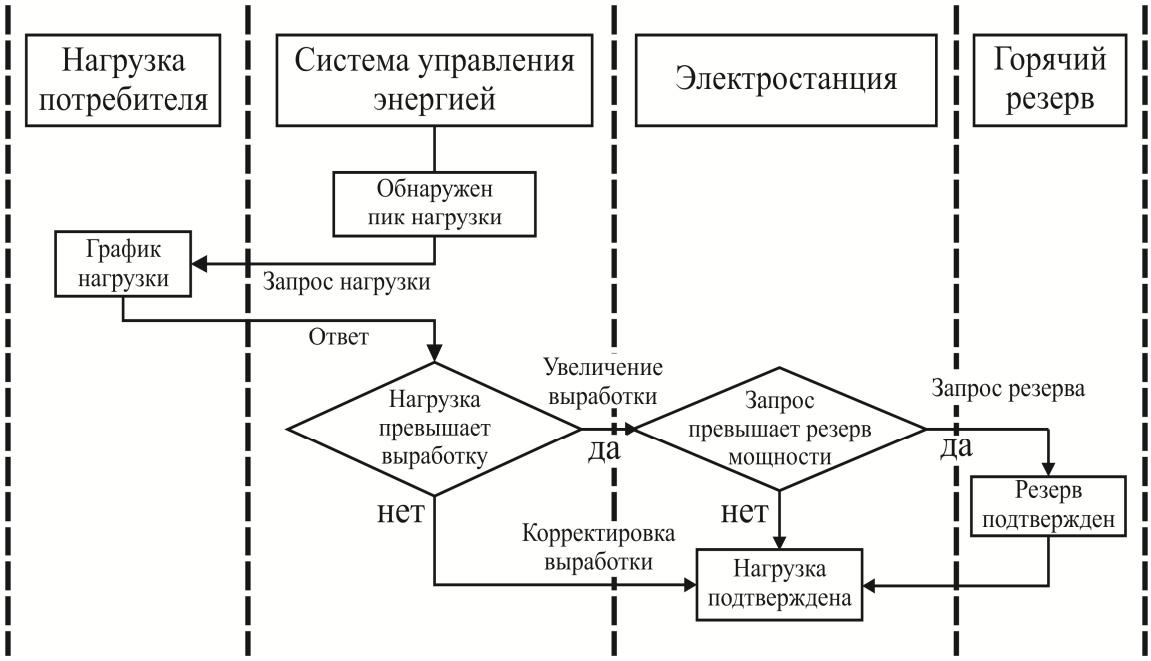
Одним из критериев оптимизации алгоритма расписания может являться количество первичных энергоресурсов, требуемых для производства единицы энергии. Так как фактор влияния на окружающую среду энергии, произведенной от сжигания твердого топлива, учитывается в общей стоимости электроэнергии, прежде всего при больших пиковых нагрузках, то есть смысл также сдвигать потребление электроэнергии к периодам времени, когда возобновляемые источники имеют более высокое процентное соотношение в общей генерации. В данной схеме индивидуальные потребители должны быть готовыми предоставить свои приборы, для которых нужно составить расписание согласно требованиям по потреблению низкоуглеродистого топлива (от возобновляемых источников энергии), используя непрерывные данные о потреблении электроэнергии. Когда будут задействованы все возобновляемые источники, остаток спроса может удовлетворяться за счет других ресурсов, начиная с тех, которые для производства энергии требуют наименьшего количества природного топлива.

Другим оптимизационным критерием может служить сокращение стоимости энергии при использовании самых доступных и дешевых ресурсов. Здесь главная цель – это сократить стоимость электроэнергии за счет оптимального размещения ресурсов для потребителей, которые включают выбранные приборы в то время, когда стоимость электроэнергии минимальная. В этом случае большие пиковые нагрузки должны перераспределятся на непиковые периоды, так как стоимость энергии в это время самая низкая. Эти две опции расписания могут накладываться друг на друга, так как стоимость углеводорода для производства энергии меньше, когда потребление сокращено во время непиковых часов и процентное соотношение возобновляемых источников в общей генерации наиболее высокое. Таким образом, комбинация обеих опций расписания может использоваться для оптимального соотношения между низкой ценой на электроэнергию и меньшим влиянием на окружающую среду.

На рисунке изображен процесс взаимодействия между системой управления энергией СУЭ, агрегатной потребительской нагрузкой НП, электростанцией ЭС и резервным источником – ВР, когда в умной сети обнаруживается пик потребления мощности. При возникновении такого события, СУЭ посылает своим клиентам запрос о расписании, чтобы спрос соответствовал доступному предложению, путем повторного распределения (пе-

реноса) некритических нагрузок на непиковые периоды. Если спрос на энергию после перераспределения все еще выше размещенного заказа на энергию, СУЭ высылает запрос к ЭС о повышении ее производительности на величину, равную разнице между повторно распределенным спросом на энергию и бюджетом СУЭ. Если окажется, что запрошенная дополнительная мощность больше, чем доступная мощность генерации ЭС, то запрос посылается в резервные источники, чтобы удовлетворить спрос клиентов на энергию СУЭ [2].

Если после повторного распределения клиентская нагрузка стала меньше, чем бюджет, размещенный в СУЭ, то электростанции посылается запрос о снижении производительности и консервации энергии. Это гарантирует лучшее размещение ресурсов генерации по сравнению с обычной сетью распределения энергии путем простой смены спроса на энергию до периодов низкого спроса.



Процесс взаимодействия между элементами в умной сети

Если все же невозможно удовлетворить весь спрос, то энергоснабжающая компания прибегает к контролируемому частичному отключению нагрузки с учетом важности и ответственности потребителей. Вопрос решается, исходя из категории потребителей по надежности электроснабжения и минимума ущерба для остальных. Разные клиенты будут иметь разные предпочтения и приоритеты в зависимости от их ролей в сети. Согласно приоритетам клиенты группируются на разные классы обслуживания по времени регистрации – инициации сервиса. Такая концепция сервиса на основе классов помогает улучшить надежность сети и дифференцировать сервисы клиентам во время событий выхода из строя. Например, больницы

или экстренные службы никогда не должны испытывать перерывов в электроснабжении, в то время как возможные сервисы других менее ответственных клиентов могут быть оставлены без внимания. На таких объектах последующий спрос необходимо снизить с тем, чтобы предотвратить выход из строя работающего оборудования, которое в больнице должно быть самым последним в очередь на пересоставление расписания. Составитель расписания должен отсоединять нагрузки согласно сервисным классам, приписанным к ним во время выведения нагрузки. Потребитель в каждом классе обслуживания может самостоятельно придать очередность работы своим приборы согласно их предпочтениям, что поможет составителю расписания принимать решения по расписанию для клиентов. Чтобы не допустить отказа приборов, автоматически происходит перерасписание некритических нагрузок в самом низком приоритетном классе обслуживания. Таким образом с помощью сервис – классов и дифференциации типов потребителей обеспечивается качество сервиса.

Приоритеты разных классов приписаны разным типам потребителей согласно их категории. Например, больница оказывает помощь пациентам в условиях реанимации и эти условия требуют более надежной поставки энергии. В то же время жители частного дома, как предполагается, более гибки в своем спросе на электричество. Более того, каждый сервис-класс содержит подклассы, внутри которых также расставляются приоритеты. Например, клиника общей практики имеет более низкий приоритет по сравнению с клиникой специальной или больницей с отделениями по оказанию экстренной помощи и реанимации. Наличие таких подклассов может обеспечить более правильные решения по расписанию нагрузки.

Библиографический список

1. Четошникова, Л.М. Процесс управления мощностью в распределенной интеллектуальной сети / Л.М. Четошникова, Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников // Электрика.– 2012. – № 7.– С. 6–9.

2. Gormus, S. Performance comparison of cooperative and non-cooperative relaying mechanisms in wireless networks / S. Gormus, D. Kaleshi, J. McGeehan, and A. Munro // IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, Apr. 2006.

УДК 621.316.7

ВЫРАВНИВАНИЕ ГРАФИКА НАГРУЗКИ В УМНОЙ МИКРОСЕТИ

Л.М. Четошникова, С.А. Четошников

Стремление сократить последствия углеводородных источников энергии на окружающую среду стимулирует поиск новых решений при создании умной сети, позволяющих сократить затраты твердого топлива, согласовать спрос до доступного предложения и улучшить эффективность использования источников энергии.

Ключевые слова: умная сеть, график нагрузок, возобновляемые источники энергии

Попытки использования умной сети в системе электроснабжения потребителей мотивированы необходимостью обеспечения все возрастающего спроса на электроэнергию и снижения нагрузки на окружающую среду. В настоящее время мероприятия по поддержанию соответствия предложения растущему спросу на энергию может быть не только затратным, но и неэффективным при длительной эксплуатации. Поэтому цель умной сети это не только соответствие предложения спросу, но и наоборот, приведение в соответствие спроса имеющемуся предложению с использованием современных технологий и заинтересованности потребителей через оптимальное ценообразование.

На рис. 1 показан примерный суточный график потребления электроэнергии, который, как известно, является неравномерным. Пик потребления электроэнергии приходится на период между t_2 и t_3. Неравномерность потребления электрической энергии вызывает увеличение стоимости ее производства и передач, что в свою очередь, приводит к росту затрат потребителей энергии. В настоящее время энергосистема обязывает предприятия снижать нагрузку в часы максимума. Это приводит к определенным трудностям при выполнении производственных планов и снижению технико-экономических показателей деятельности предприятия.

Требования к энергосистеме (пропускная способность, количество линий и подстанций) определяются именно пиковыми нагрузками с учетом «резерва мощности». Грамотное применение двухставочного тарифа позволяет снизить нагрузки в пиковые часы, сгладить суточный график потребления и тем самым создать определенный запас мощности в существующей энергосистеме. В этом случае возникает достаточный резерв увеличения спроса при сохранении существующей сетевой инфраструктуры.

Для обеспечения повышенного спроса на электроэнергию энергоснабжающие компании отслеживают повышенный спрос и задействуют мощность дополнительных ресурсов, например, пиковых электростанций. При

этом вовлечение дополнительных ресурсов генерации энергии требуют больших капитальных вложений и оперативного расширения части компаний. Если для производства энергии применяют невозобновляемые источники, то они еще могут оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

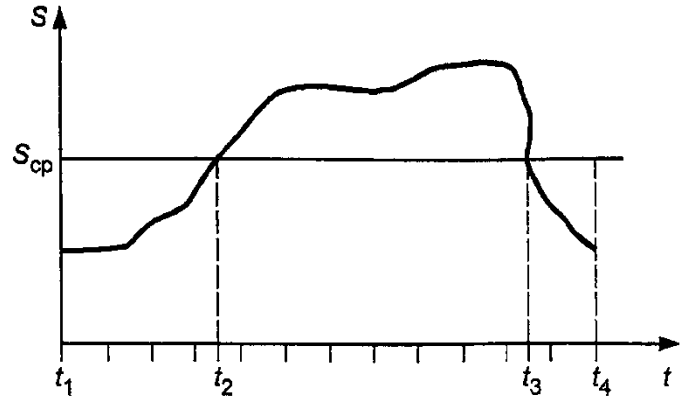


Рис. 1. Суточный график потребления энергии

Доля этих источников может быть сокращена путем выравнивания графика потребления электрической энергии (рис. 1). Теоретически добиться усреднения спроса можно за счет мотивации частных потребителей регулировать спрос на электроэнергию с последующим их поощрением. В этом состоит ключевая идея поддерживания умной сети: стимулировать потребителей снижать или увеличивать энергопотребление в соответствии с предложением в то или иное время суток. Реализация данной идеи возможна путем разработки системы ценообразования, а также доступности энергии от собственных ветровых или солнечных электростанций. Это не только улучшит оперативную эффективность энергоснабжающих компаний, но также поможет избежать капитального инвестирования для генерирования дополнительной энергии, снизить зависимость от углеводородного топлива, что в итоге приведет к сокращению отрицательного влияния на окружающую среду.

Чтобы реализовать данное направление, требуется выполнение нового уровня интеллектуального управления в существующей сети с обратной коммуникацией между сетью и запросами клиентов, т. е., возникает необходимость в коммуникационной инфраструктуре и соответствующих протоколах. Это касается измерительных технологий и программного обеспечения, необходимых для информирования потребителя о текущем ценообразовании с тем, чтобы позволить им отрегулировать график нагрузки, который будет визуализироваться как задача составления расписания [1].

Интеллектуальная сеть дает разнообразные возможности каждому потребителю через оптимальное управление электропитанием уравновесить энергию в системе, связанной с собственными источниками энергии, на-

грузкой (потреблением) и хранением с использованием энергоемких батарей.

Современная сеть состоит из следующих главных элементов (рис. 2): генерационная система, системы распределения электроэнергии (шины распределительных подстанций), системы передачи (воздушные и кабельные линии) и потребитель. Генерационная система состоит из совокупности разных источников, которые вырабатывают энергию.

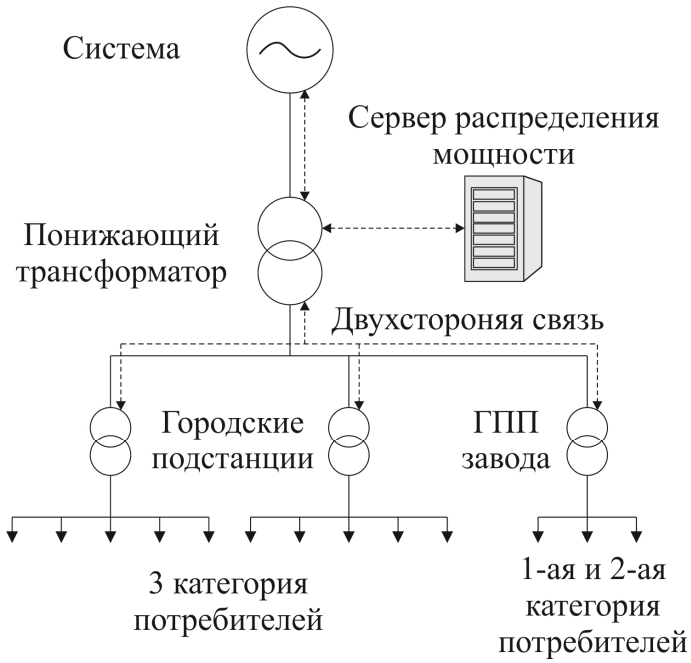


Рис. 2. Элементы электрической сети

Источники могут быть возобновляемые или невозобновляемые. Выработанная энергия транспортируется от генерационной системы до системы распределения к потребителю. Подключение в качестве резервных невозобновляемых источников энергии решает проблему удовлетворения спроса, но это мероприятие неэффективно вследствие того, что средняя требующаяся мощность чаще всего намного меньше, чем подключенная пиковая мощность. Кроме того, что эти электростанции неэкологичны, они также требуют и огромных капитальных и эксплуатационных затрат. Неиспользованная мощность должна либо идти на другие цели во время непиковых часов, либо отключаться, когда не используется. Поэтому, перераспределение избыточного спроса на непиковые часы или на доступную энергию помогает достичь лучшего применения генератора и меньших источников энергии, что приводит к снижению стоимости электроэнергии для поставщика и нагрузки на окружающую среду.

Рассмотрим систему, показанную на рис. 2. Пусть $P_{\text{ген}}$ – генерируемая мощность, $P_{\text{доп}}$ – максимальная дополнительная мощность для удовлетво-

рения избыточного спроса. Тогда общая мощность, к которой генерационная система имеет доступ, будет равна

$$P = P_{\text{ген}} + P_{\text{доп}}. \quad (1)$$

Предположим вначале, что генерационная система не нуждается в источниках дополнительной мощности. Пусть имеется n систем распределения и m потребителей, подключенных каждый к своей системе распределения. Пусть P_i – мощность i-й системы распределения и P_{ij} – это часть мощности j-го потребителя, соединенного с системой распределения i. Поэтому

$$P_{\text{ген}} = \sum_{i=1}^{n} P_i = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{ij} . \quad (2)$$

В этом случае, чтобы не было превышения доступной мощности, необходимо обеспечить баланс между генерируемой мощностью и мощностью нагрузки, т. е. привести в соответствие спрос и предложение. А далее следует еще одна задача – благоприятное размещение ресурсов. Задача решается путем составления оптимального расписания включения нагрузки потребителей без превышения $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{ij}$.

Для эффективной работы интеллектуальных сетей необходима совокупность устройств, устанавливаемых в электрической сети и предназначенных для стабилизации напряжения, повышения управляемости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь, повышения статической и динамической устойчивости, а в итоге – повышения пропускной способности сети и снижения потерь [2].

Библиографический список

1. Четошникова, Л.М. Управление энергией и сервис-ориентированные сети / Л.М. Четошникова, Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012.– Вып. 17, № 16 (275). – С. 98–102.

2. The New Frontier of Communications Research: Smart Grid and Smart Metering / Z. Fan, G. Kalogridis, C. Efthymiou et al. // ACM E-Energy Conference, Passau, Germany, Apr. 2010.

УДК 539.125.5

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОЦЕССОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЯДРА АТОМА $_{83}Bi^{210}$

А.В. Шешуков, В.В. Шешуков, Р.Р. Нараева

Данная разработка относится к области ядерной энергетики. Устройство предназначено для получения тепла без преобразования его в механическую энергию, например для обогрева зданий. Задачей заявляемого технического решения является создание простого по конструкции и дешёвого в изготовлении ядерного реактора, предназначенного для получения тепловой энергии.

Ключевые слова: реактор, дейтерий, нейтрон, висмут, тепловая энергия.

Поставленная задача решается тем, что в реакторе (см. рисунок), содержащем бак с циркуляционной водой, установлен рабочий контейнер с подогреваемым, нагревательным элементом, дном – анодом, на котором находится расплавленный висмут, в атмосфере изотопа водорода $_1H^2$, облучаемого быстрыми электронами, вылетающими с поверхности нагреваемого катода.

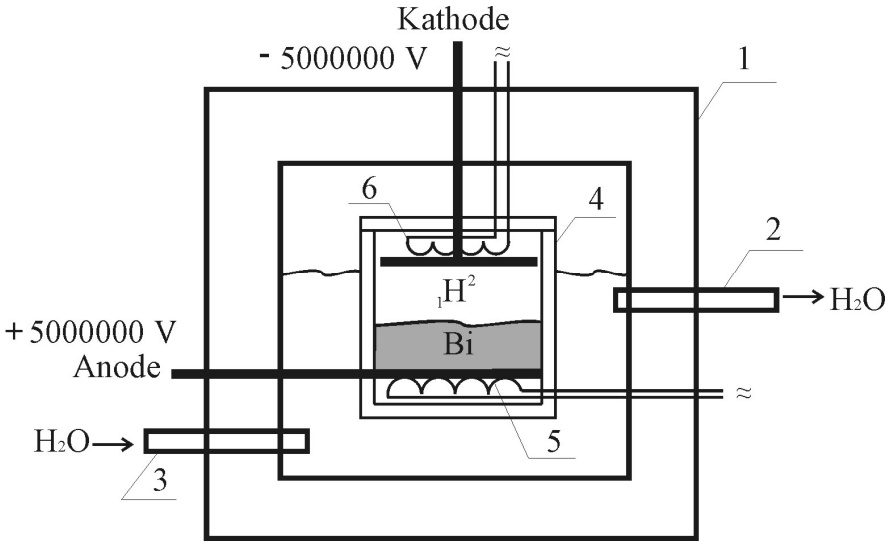


Рис.1. Реактор на тепловых фотонах содержит: диэлектрический корпус 1 с выпускным 2 и впускным 3 водоводами, внутри которого расположен керамический контейнер 4, с нагревателем 5 анода и с нагревателем 6 катода

В реакторе используются не радиоактивные изотопы висмута $_{83}Bi^{210}$ и водорода $_1H^2$. Реакция протекает по схеме:

1) $_1H^2 + e^- \rightarrow {}_1H^1 + e^- + {}_0n^1$;

2) $_{83}Bi^{210} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{82}Pb^{207} + 2{}_0n^1 + {}_0n^1 + p^+$.

Для эмиссии нейтронов используется высоковольтный наносекундный разряд в дейтерии [1]. В экспериментах использовалась установка, состоящая из импульсного генератора, газонаполненного диода и системы регистрации. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке составляла ~ 2 ns, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 0,5 ns.

Установки для получения нейтронов, основанные на импульсных наносекундных разрядах, являются более простыми и дешевыми по сравнению с установками, включающими фемтосекундные лазеры.

Для получения нейтронов в разрядной плазме необходимы энергии ионов в сотни электрон-вольт, что наиболее легко реализовать при энергии электронов в сотни килоэлектрон-вольт и плотности тока разряда более 1 kA/cm^2 [2]. Проанализируем более подробно условия в плазме дейтерия и других газов при наносекундном разряде. В низкотемпературной слабоионизованной плазме газового разряда электроны приобретают энергию направленного движения от электрического поля и расходуют ее главным образом на ионизацию и возбуждение нейтральных частиц. При высоких значениях отношения напряженности электрического поля к давлению газа (параметра E/P) энергия, приобретаемая электроном на единице длины пути, может превышать энергию, отдаваемую в неупругих столкновениях, и электрон будет переходить в режим непрерывного ускорения. При этом энергия значительной части электронов может соответствовать напряжению, которое приложено к промежутку. Отметим, что и при низких электрических полях в плазме электрического разряда в «хвосте» максвелловского распределения электронов по энергиям присутствуют электроны с высокой энергией, однако их число очень мало, и эти электроны не оказывают заметного влияния на характеристики разряда.

Число электронов, которые переходят в режим непрерывного ускорения при заданной амплитуде импульса напряжения и величине межэлектродного зазора, зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются форма и материал электродов, скорость нарастания напряжения на промежутке и состав газа. Критическое поле E_{cr}, при котором часть электронов в случае однородного и постоянного электрического поля в промежутке переходит в режим убегания в газе, можно определить из выражения, полученного Гуревичем [3]

$$E_{cr} = 4\pi e^3 n_0 Z/2{,}72\, I, \qquad (1)$$

где n_0 – плотность молекул газа, I – средняя энергия неупругих потерь, Z – число электронов в молекуле, e – заряд электрона. Из формулы (1) следует условие, при котором электроны в газовом разряде движутся в режиме непрерывного ускорения

$$E_{cr}/P = 3{,}38 \cdot 10^3 Z/I. \qquad (2)$$

Например, для молекул водорода (дейтерия) $Z = 2$, $I = 50$ eV [2], $E_{cr}/P = 150$ V/(cm · Torr). Такая величина E/P относительно просто достигается в наносекундных импульсных разрядах при коротком фронте импульса напряжения, в которых усредненная по зазору напряженность электрического поля может достигать величины ~ 10^6 V/cm. Однако только малая часть электронов в дейтерии при $E_{cr}/P = 150$ V/(cm · Torr) перейдет в режим убегания. Причина – ионизация газа быстрыми электронами, в результате которой экспоненциально увеличивается число медленных электронов.

Для увеличения доли убегающих электронов в плазме газового разряда необходимо существенно увеличивать E_{cr}/P. Эта задача была решена в работах С.И. Яковленко с сотрудниками [4]. Если рассматривать совокупность размножающихся электронов, нельзя переносить соображения, относящиеся к отдельному электрону, на все электроны. Нельзя считать, что средняя энергия электронов постоянно увеличивается с ростом x при $E > E_{cr}$. Дело в том, что электроны размножаются экспоненциально (образуют лавину), а набор энергии электронов с расстоянием происходит в однородном поле лишь линейно. Поэтому средняя энергия, приходящаяся на один электрон, перестает увеличиваться с ростом x при достаточно большом значении x. Для однородного электрического поля были получены значения E_{cr}/P для различных газов с учетом вклада медленных электронов, которые появляются вследствие ионизации. Яковленко был предложен простой нелокальный критерий убегания электронов, при котором значительное число электронов (более 10 %) переходило в режим убегания [4, 5]

$$\alpha_i(E_{cr}, P)d = 1, \qquad (3)$$

где α_i – первый коэффициент Таунсенда, d – межэлектродный зазор. Значения E_{cr}/P, полученные с учетом размножения электронов, превышали значения, полученные из формулы (1), для одинаковых условий в 5 раз. Отметим, что значения E_{cr}/P из [4] для гелия довольно хорошо совпали с данными работы [6] для гелия при расчете E_{cr}/P из экспериментально измеренного максимального напряжения на промежутке. В [6] убегание электронов исследовалось при сравнительно однородном электрическом поле в малых межэлектродных промежутках и при малых давлениях.

Время жизни свободного нейтрона составляет 885,7 ± 0,8 с (что соответствует периоду полураспада 613,9 ± 0,6 с), отдав свою энергию в виде тепловых фотонов, нейтрон распадётся на протон, электрон и антинейтрино: ${}_0n^1 \rightarrow p^+ + e^- + \nu^-$

Энергия связи ядра атома дейтерия (${}_1H^2$) $E_{св} = 2{,}23$ МэВ.

Энергетический выход реакции: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.

$\Delta m = M({}_{83}Bi^{210}) + M({}_0n^1) - M({}_{82}Pb^{207}) - M(3\,{}_0n^1) = 209{,}980 + 1{,}0086650 -$

$- 207{,}200 - 3 \cdot 1{,}0086650 = 0{,}76267$ а.е.м.;

ΔE на 1 а.е.м.: $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ [кг] $\cdot$ $9 \cdot 10^{16}$ [м$^2 \cdot$с$^{-2}$] = $1{,}49 \cdot 10^{-10}$ [Дж] =

= 931 [МэВ];

$\Delta E = 0{,}76267 \cdot 931 = 710{,}04577$ МэВ.

Вычислим количество выделяемой энергии на 1 килограмм висмута:

$E = \Delta E/1$ а.е.м. $= 1{,}49 \cdot 10^{-10} / 1{,}66 \cdot 10^{-27} = 0{,}897590 \cdot 10^{17}$ Дж.

Реактор работает следующим образом: при подаче высокого напряжения, вылетающий из катода электрон, выбивает из изотопа водорода нейтрон, сообщая ему свой импульс движения, движущийся нейтрон выбивает из атома висмута два нейтрона, которые в результате бета распада превращаются в протон (p^+) с испусканием электрона (e^-), антинейтрино (ν^-) и тепловых фотонов [7]. Как видно из расчёта выход энергии превышает затраты в 350 раз. Так как коэффициент размножения нейтронов равен 3, то реакция будет проходить только при наличии первичных нейтронов, то есть при наличии питающего напряжения. Это гарантирует автоматическое отключение установки при аварийных ситуациях. Кроме того в реакции не образуются радиоактивные отходы.

Библиографический список

1. Ломаев, М.И. Эмиссия нейтронов при наносекундном разряде в дейтериив в неоднородном электрическом поле / М.И Ломаев, Б.А Нечаев // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 1.

2. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 313, № 4. – С. 846–849.

3. Гуревич А.В. // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39. – С. 1296–1301.

4. Яковленко, С.И. Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе / С.И. Яковленко // Труды ИОФАН. – М.: Наука, 2007. – Т. 63.

5. Тарасенко Ф.М., Яковленко С.И. // УФН. – 2004. – Т. 174, № 9. – С. 953–971.

6. Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. – 1981. – Т. 51, вып. 9. – С. 1823–1831.

7. Khafizov R.U., Severijns N., Zimmer O., Wirth H.-F., Rich D., Tolokonnikov S.V., Solovei V.A., Kolhidashvili M.R. – http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0512001.

УДК 536.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ВЫСШЕГО РОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В.В. Шешуков, Р.Р. Нараева

Использование механизма фазового превращения высшего рода позволяет повысить экономичность двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: Ионизация, электрон, катализатор, синтез молекул.

Основу механизма фазовых превращений высшего рода (ФПВР) составляет электродинамическое взаимодействие свободных электронов с атомами вещества, при котором отрицательно заряженный электрон отдаёт свою кинетическую энергию (электродинамически) окружающим атомам и частицам, при этом излучаются фотоны, которые удаляются из зоны реакции в пространство. Как видно из такого краткого описания механизма ФПВР, для его протекания необходимы два условия: первое – плазма – состояние ионизированного раздробленного вещества, по крайней мере, на атомы; второе – наличие свободных электронов [1].

В физике, к настоящему времени, накопилось множество фактов, не укладывающихся в общепринятую теорию. Одним из них является взрыв кислородных баллонов. Разрушения, произошедшие в результате взрыва баллона с кислородом, соответствуют энергии взрыва примерно 1 кг ВВ в тротиловом эквиваленте. Энергия взрыва 1 кг ТНТ равна 4228 кДж. Удельная теплота сгорания углеводородов типа масла составляет около 43 000 кДж/кг. Таким образом, количество масла, вступившего в реакцию с кислородом должно быть около 100 граммов. При этом оно должно образовывать аэрозоль с кислородом, чего конечно не было. Энергия разгерметизации самого болона емкостью 50 литров (0,05 м^3) и давлением газа 150 атмосфер, может быть посчитана по формуле

$$W = \int_{0,05}^{50} Pdv \approx \{P \sim S(4\pi r^2);\ V = (4/3)\pi r^3 \rightarrow r_1 = (0,05\cdot 3/4\pi)^{1/3} = 0,23;$$

$$r_2 = (50\cdot 3/4\pi)^{1/3} = 2,27\} = P\int_{r1}^{r2} Sds = 150\cdot 10^3\cdot (2,27)^2/2 - (0,23)^2/2 =$$

$= 382,5\cdot 10^3$ Дж.

Что примерно в 11 раз меньше натурной энергии взрыва, и не может вызвать таких разрушений.

Другим примером может служить расхождение энергии взрыва атомного заряда, одной и той же мощности, под землёй и в воздухе. По результа-

там проведённых испытаний разница получается на 2–3 порядка. Откуда же появляется избыточная мощность? Источником дополнительной энергии, по нашей теории является сам кислород.

Наименьшая энергия ионизации электрона атома кислорода равна E_i = 13,618 эВ, а энергия связи этого электрона с ядром атома, соответствующая первому энергетическому уровню E_1 = 13,752 эВ. Назовем этот электрон первым. Расчет энергетических показателей этого электрона, в том числе и энергий связи E_b его с ядром атома, по формулам (1) и (2) даёт следующие результаты (см. таблицу) [2].

$$E_{ph} = E_i - E_i/n^2 = E_i - E_1/n^2, \quad (1)$$

$$E_b = E_1/n^2, \quad (2)$$

где n энергетический уровень.

Спектр первого электрона атома кислорода, эВ

Значения	2	3	4	5	6
E_{ph} (эксп.)	10,18	12,09	12,76	13,07	13,24
E_{ph} (теор.)	10,16	12,09	12,76	13,07	13,24
E_b (теор.)	3,44	1,53	0,86	0,55	0,38

Структура молекулы кислорода, показана на рисунке.

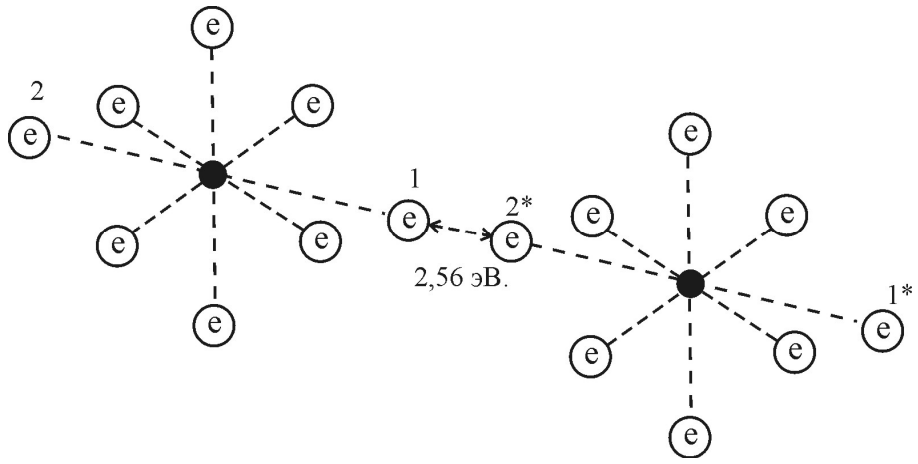


Схема распределения энергий связи между электронами
в молекуле кислорода

Она образуется путем соединения разноименных магнитных полюсов осевых электронов двух атомов кислорода [2]. Известно, что процесс синтеза молекул кислорода сопровождается выделением энергии 495 кДж/моль или в расчете на одну молекулу:

$$E_b = (495 \cdot 1000)/(6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{19}) = 5{,}13 \text{ эВ}. \quad (3)$$

Два атома кислорода соединяются в молекулу в состоянии возбуждения. Это – экзотермический процесс, при котором осевые валентные электроны 1 и 2*, излучая фотоны и опускаясь на более низкие энергетические уровни, выделяют 2,565×2 = 5,13 эВ. Обратим внимание на то, что энергия 5,13 эВ выделяется двумя электронами, формирующими связь с энергией 2,56 эВ. Для разрушения этой связи достаточно затратить 2,56 эВ механической энергии. В таком состоянии электроны не могут оставаться, они должны немедленно восполнить энергию, которую они не получили при механическом разрыве связи между ними. Где они её возьмут? Источник один – окружающая среда, то есть физический вакуум, заполненный эфиром [3]. Следующая фаза – соединение двух атомов кислорода, валентные электроны которых пополнили запасы своей энергии за счет эфира. Этот процесс сопровождается излучением двумя электронами фотонов с энергиями 2,56 эВ. Так энергия поглощенного эфира преобразуется в тепловую энергию фотонов. Затратив 2,56 эВ механической энергии на разрушение молекулы кислорода, при последующем синтезе этой молекулы мы получаем энергии в два раза больше (2,56×2 = 5,13) эВ. Дополнительная энергия оказывается равной 2,56 эВ. Таким образом, для выделения энергии равной 4228 кДж, потребуется 8,54 молей ионизированного кислорода, что составляет менее 40 % массы кислорода, содержащимся в 50-литровом баллоне.

В 1978 году группа ученых японского института Clean Engine Research, пытавшихся оптимизировать процесс сгорания топлива в двухтактных мотоциклетных моторах, случайно зафиксировала необычный феномен, названный HCCI (Homogeneous charge compression ignition). При достижении определенного давления в камере бензинового двухтактного двигателя возгорание топливовоздушного заряда происходило без искры свечи зажигания. Но самое интересное – вместо привычного зажигания смеси около свечи и последующего распространения пламени на периферию в камере одновременно возникало огромное количество микроочагов возгорания. Как следствие, смесь сгорала при более низкой, чем обычно, температуре, очень быстро и практически полностью. Имеющийся в то время математический аппарат и уровень развития термодинамики не позволили понять причины возникновения феномена HCCI, и его посчитали курьезом. Через 20 лет в арсенале инженеров появились мощные средства компьютерного моделирования, которые помогли приоткрыть завесу тайны над HCCI. Работы в этой области в конце 1990-х годов начались в Германии (Mercedes-Benz, Volkswagen), Японии (Nissan) и Америке (General Motors). Но без новой теории горения особых успехов они не имели.

И только в последние пять лет появились примеры работы энергоустановок с ФПВР, который интенсивнее обычного горения, и преимущественно основан на частичном расщеплении воздуха и воды. Так в двигате-

лях внутреннего сгорания (ДВС) был получен режим работы, при котором расход топлива (бензин) уменьшается в 5–6 раз, и при этом возрастает мощность. В результате исследования выхлопных газов ДВС обнаружено повышенное содержание водяного пара, углерода в виде мелкого графита, кислорода, и пониженное содержание азота и углекислого газа. Хорошей иллюстрацией этого процесса могут быть эксперименты по воздействию сильных магнитных полей на топливовоздушную смесь [4]. В результате серии опытов было установлено снижение CO в 1,4 раза, CH в 1,5 раза, NO_x в 1,3раза. Увеличение водяных паров в 1,3 раза. Попытаемся это объяснить. Распад азота с образованием воды может идти по следующим реакциям:

$$N_2 = C + O, \quad (4)$$

$$N_2 = 2C + 4H, \quad (5)$$

$$2H + O = H_2O. \quad (6)$$

Поскольку нам неизвестны дефекты массы продуктов азотной реакции, в первом приближении можем определить теплоту реакции по теплотворной способности водорода Q_{H_2} = 121 МДж/кг. Исходя из уравнения (5) доля водорода в азотной реакции составляет 0,101 кг на каждый килограмм воздуха. Отсюда – теплота азотной реакции (по теплотворной способности водорода) на 1 кг воздуха составит

$$Q_p^H = 121 \cdot 0{,}101 = 12{,}2 \text{ МДж/кг}.$$

Теплота азотной реакции на 1 кг топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) из расчета ~30 кг воздуха на 1 кг топлива (с учетом коэффициента избытка воздуха) составит:

$$Q_T = 30 Q_p^H = 366 \text{ МДж/кг},$$

что в 9 раз больше, чем теплотворная способность топлива.

Библиографический список

1. Базиев, Д.Х. Основы единой теории физики / Д.Х. Базиев // Педагогика. – М., 1994. – 642 с.

2. Канарев, Ф.М. Начала физхимии микромира / Ф.М. Канарев. – Краснодар, 2002. – 320 с.

3. Шешуков, В.В Новый взгляд на строение материи / В.В. Шешуков, В.Я. Гроо. – Челябинск: Дом печати, 2011. – 104 с.

4. Поляцко, В.Л. Экспериментальные исследования влияния магнитного поля на экологические показатели автомобильного двигателя / В.Л. Поляцко, В.С. Морозова, В.С. Гун. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15, № 10 (186).

УДК 621.313.8 + 621.313.32

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ВЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Н.В. Клиначев, Н.Ю. Кулёва, Н.Ю. Сидоренко

Составлена совокупность моделей, исполняемая программой Jigrein, позволяющая решать задачу выбора оптимальных параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами для безредукторного следящего электропривода.

Ключевые слова: электропривод моментный; векторное управление; вентильный двигатель; СДПМ; оптимизация параметрическая; моделирование движения; Jigrein; motor control; FOC-control; PMSM.

Задача повышения качества электроприводов для стабилизированных платформ актуальна в связи с высокими техническими требованиями и жесткими условиями их эксплуатации. Развивается элементная база, появляются новые инструменты разработчика, повышаются требования – необходимо пересматривать существующие решения. Опыт эксплуатации ставит главную цель совершенствующей разработки – отказ от редуктора. В отдельных случаях это возможно. Однако моментный двигатель – изделие дорогое, и, как правило, несерийное. Поэтому допустимы компромиссные решения, допускающие применение двигателей с неоптимальными параметрами. Если же стоит задача ответственной разработки, параметрическая оптимизация необходима – лишь в этом случае разработчик электрической машины получит однозначное техническое задание, а при принятии компромиссного решения будет ясна его цена.

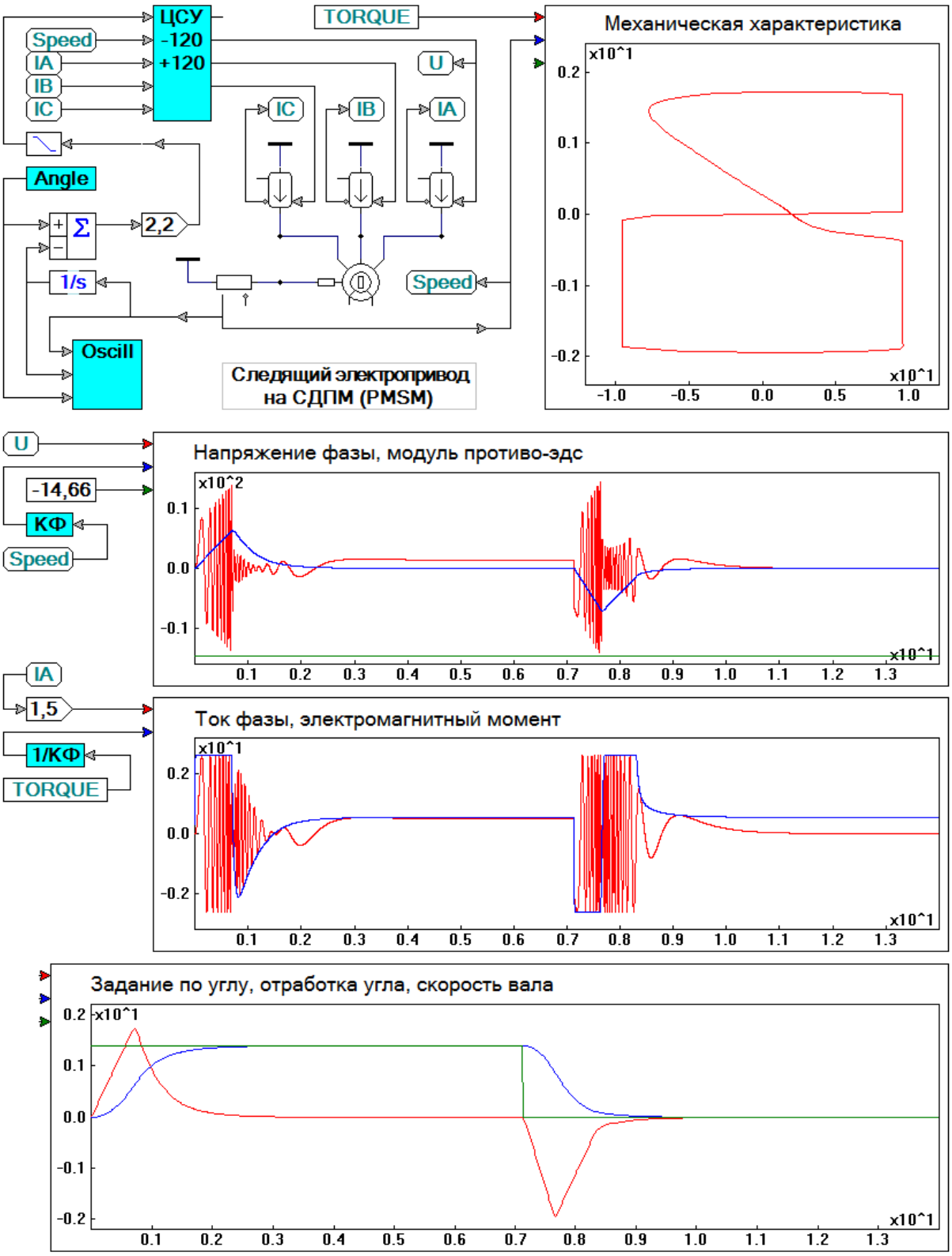
Решать задачу разработки моментной электрической машины для электропривода стабилизированной платформы необходимо в три этапа. На первом этапе фиксируются номинальное напряжение источника питания и механические параметры платформы – момент инерции, активный момент, момент вязкого трения, параметры механического возмущения, отрабатываемый угол, номинальное ускорение инерционной массы. На втором этапе – разрабатывается система управления следящего привода, и синтезируются паспортные параметры моментного двигателя с вариацией для составляющих произведения конструктивного коэффициента и потока ($k \cdot \Phi$), т. е. для вариации числа пар полюсов. На третьем этапе, в соответствии с паспортом и при использовании суперкомпьютера, разрабатывается электрическая машина (СДПМ). Составляется заключение о возможности ее изготовления или предлагается вариант машины с неоптимальными

параметрами. Завершает разработку специалист по системам управления. Выполняет поверочный расчет привода с неоптимальной машиной (этап 2) и фиксирует цену её использования (превышения по энергопотреблению и массогабаритным показателям).

Порядок разработки определен техническим уровнем развития инструментов. Вычислительные ресурсы суперкомпьютеров дороги. Расчеты продолжительны. Визуализация полей в трехмерных сетках помогает оптимизировать машину. Но погрешность, связанная со свойствами материалов (для идентификации которых существуют лишь эмпирические методы) остается существенной. Поэтому на третьем этапе разумно выполнять лишь конструктивную оптимизацию машины, а параметрическую – оставить за специалистом по системам управления. Чей инструментарий – математические программы для моделирования поведения сложных технических систем – доступен, хорошо зарекомендовал себя и не требует особых вычислительных ресурсов.

Для выполнения многократной повторной настройки сложной, трехконтурной системы управления (с вариацией параметров объекта) авторами была разработана совокупность моделей [1] и методические рекомендации (позволяющие решить, обозначенную задачу за приемлемый временной интервал). В качестве инструмента – выбрана версия программы Jigrein [2] для веб-платформы (визуализирующая и исполняющая модели в окне браузера). Модели встроены в html-документ, совместно с документирующей составляющей. Задача инженера – в соответствии с техническим заданием, в копии документа, изменить параметры машины, рабочего органа, настроить регуляторы и проанализировать результат. Сценарий настройки системы – шаговый. Инженер последовательно модифицирует каждую модель, перенося результаты настройки предшествующей в последующую.

На первом этапе уточняются энергетические затраты необходимые для разгона инерционных масс с заданным ускорением. Для решения этой задачи предложена модель, в которой прототип машины (ДПТ) запитан от источника тока и организован релейный реверс. Инженер должен выбрать конструктивный коэффициент ($k \cdot \Ф$), обеспечивающий при номинальной скорости величину противо-эдс в машине равную половине питающего напряжения (согласованный режим работы). И уточняет сопротивление обмотки за вычетом внутреннего сопротивления источника. Номинальное напряжение фазы машины определяется первичным источником (АКБ) с учетом ввода третьей гармоники в трехфазную систему питающих напряжений. То есть с учетом применения пространственной векторной модуляции позволяющей увеличить фазное напряжение на 15 %.



Модель следящего электропривода составленная в программе Jigrein. Задание по углу отработано при воздействии на вал активного момента. Визуализация чертежа и расчет движения координат выполнены браузером

Последующие три этапа (три модели) предполагают последовательную настройку регуляторов контуров тока, скорости и положения [3]. Рекомендовано использовать частотный метод (ЛАЧХ и ЛФЧХ), позволяющий исключить процедуру распределения контурного коэффициента по модулям системы и сократить время разработки.

Предварительная разработка модели системы управления завершается переходом от эквивалентного ДПТ в приводе к СДПМ (см. рисунок). Параметры регуляторов подчиненных контуров переносятся без модификаций. Переход сопровождается созданием двух или трех копий модели отражающих возможное количеством пар полюсов СДПМ, которое должен уточнить разработчик электрической машины (достигая заданный $k \cdot \Phi$).

Отдельное затруднение заключается в том, что разработчик прототипа системы управления для следящего привода должен решить две дополнительные задачи. Во-первых, не путаясь в версиях, контролировать растущее количество файлов моделей. Во-вторых, обеспечить наглядность представления результатов коллегам. Этот вопрос закрывает программа Jigrein – ее модели встраиваются в html-документы. Последние могут быть размещены на веб-сервере. Привычный пользователям механизм гиперссылок позволяет организовать необходимые иерархические связи между ними. А для запуска моделей на рабочих местах предприятия, кроме штатного браузера поддерживающего международный стандарт HTML5, дополнительное программное обеспечение не требуется. Вопрос архивного хранения документов так же имеет решение – html-документы могут быть упакованы в один chm-файл справочной системы ОС Windows, по примеру документации [2] программы Jigrein.

Библиографический список

1. Клиначев Н.В. Цифровые управляющие системы для электропривода: фрагменты учебного курса. – http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/ dcs_knv.htm

2. Клиначев Н.В. Моделирующая программа Jigrein: Теория, программа, руководство, модели. – Offline версия 1.1.0.4. – Челябинск, 2012. – файлов 169, ил. – http://model.exponenta.ru/k2/20070810.htm

3. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: учебно-методический комплекс. – Offline версия 1.0. – Челябинск, 1995–2011. – файлов 489, ил. – http://epla.susu.ac.ru

4. Шабуров, П.О. Электропривод клапана выхода аппарата искусственной вентиляции легких / П.О. Шабуров, Е.А. Маргацкая // Электротехнические комплексы и системы: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – Вып. 20. – С. 83–90.

УДК 621.313.32 + 621.313.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАСТРАИВАЕМОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Д.А. Курносов

В статье рассматривается бездатчиковая схема векторного управления синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов. Использование настраиваемой модели двигателя позволяет отказаться от измерения механических координат привода. Предлагаемые алгоритмы управления при относительной простоте демонстрируют высокую эффективность на всех рабочих режимах привода. Приводятся результаты моделирования работы привода.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами; PMSM; вентильный электропривод; векторное управление; бездатчиковое управление; настраиваемая модель; наблюдатель.

При реализации векторного управления вентильного электропривода возникает необходимость в определении с достаточной точностью углового положения ротора относительно статора и скорости вращения ротора. Оснащение электропривода высокоточным датчиком углового положения ротора – один из путей решения этой задачи. Но этот путь не всегда возможен по технологическим и другим причинам. К тому же он ведёт к усложнению и удорожанию системы управления привода [1, 2].

В рассматриваемом в статье подходе к реализации векторного управления синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов для управления используется лишь информация о фазных напряжениях и токах электропривода. Использование моделей двигателя разного вида и наблюдателей неизмеряемых механических координат привода достаточно распространено (см., например, [3–5]). Всё дело в нюансах: виде модели, способах её реализации и настройки, достижимой точности моделирования.

В качестве настраиваемой модели выбрана модель ВД в роторной системе координат *d–q* как неявнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами и фиксированным углом нагрузки, определяемым угловым положением ротора относительно статора. Причём с целью простоты реализации и настройки выбрана модель в относительных единицах. Ниже приведены уравнения статорной цепи и механической части настраиваемой модели ВД:

$$-U\sin\theta^* = i_{dm} - \tau_e \varepsilon_m i_{qm} + \tau_e \frac{di_{dm}}{d\tau},$$

$$U\cos\theta^* = i_{qm} + \tau_e \varepsilon_m i_{dm} + \tau_e \frac{di_{qm}}{d\tau} + \varepsilon_m,$$

$$\tau_m \frac{d\varepsilon_m}{d\tau} = i_{qm} - k_P(m_e - i_{qm}) - k_I \int_0^\tau (m_e - i_{qm})\, d\tau,$$

$$\varphi_m = \varphi_{m0} + \int_0^\tau \varepsilon_m \, d\tau',$$

где θ^* – задание по углу коммутации, U – амплитудное значение относительного фазного напряжения, τ – относительное время; i_{qm}, i_{dm} – модельные токи, ε_m – модельная частота вращения ротора, φ_m – угол поворота ротора, полученный с помощью модели; φ_{m0} – начальное значение угла; τ_e, τ_m – постоянные времени модели, соответственно, электромагнитная и электромеханическая; k_P, k_I – коэффициенты, соответственно, пропорциональный и интегральный ПИ-закона регулирования контура подстройки настраиваемой модели ВД; m_e – оценка электромагнитного момента.

Особенность модели состоит в том, что её входами является напряжения *Ud* и *Uq*, формируемые в функции задания угла коммутации (желаемого значения углового рассогласования между векторами напряжения и э.д.с.). Т. е. настраиваемая модель ВД выступает здесь как *эталонная модель*, описывающая эталонный (желаемый) характер движения ВД. Другой особенностью модели является то, что она построена без учёта нагрузки. Для подстройки настраиваемой модели под реальный характер нагружения электропривода в уравнение механической части введён корректирующий контур по оценке электромагнитного момента ВД. Эта коррекция обеспечивает необходимую точность слежения настраиваемой модели за реальным ВД. Уравнение в относительных единицах для оценки электромагнитного момента приведено ниже:

$$m_e = \frac{2}{3}[i_a \sin\varphi_m + i_b \sin(\varphi_m - 2\pi/3) + i_c \sin(\varphi_m + 2\pi/3)].$$

Здесь $i,\ i_b,\ i_c$ – измеренные значения фазных токов ВД. Проблеме оценки электромагнитного момента ВД посвящена работа [6].

Оценка угла коммутации осуществляется с помощью следующего простого соотношения:

$$\hat{\theta} = \varphi_0 - \varphi_m,$$

где φ_0 – угол поворота вектора напряжения преобразователя напряжения.

Таким образом, вся необходимая для реализации векторного управления вентильного электропривода информация, а именно, значение углового положения ротора относительно статора φ_m, скорость вращения ротора ε_m и угол коммутации $\hat{\theta}$, есть. Реализация системы векторного управления вентильного электропривода представлена на рис. 1.

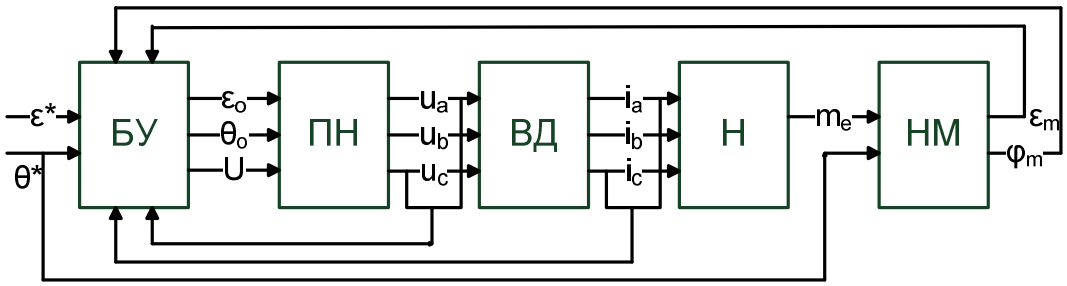


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

Здесь приняты следующие обозначения: БУ – блок управления приводом, ПН – силовой преобразователь напряжения, ВД – вентильный двигатель, Н – наблюдатель (вычислитель) электромагнитного момента ВД, НМ – настраиваемая модель (идентификатор) ВД, ε* – задание по скорости, θ_o – настраиваемая начальная фаза напряжения ПН, ε_o – настраиваемая частота напряжения ПН; u_a, u_b, u_c – фазные напряжения. ПН реализует следующую систему напряжений питания трёхфазного ВД:

$$u_a = U\sin\varphi_0\,,\ u_b = U\sin(\varphi_0 - 2\pi/3)\,,\ u_c = U\sin(\varphi_0 + 2\pi/3)\,,$$

где $\varphi_0 = \theta_0 + \int_0^\tau \varepsilon_0\, d\tau'$.

В качестве закона управления коммутацией принят следующий:

$$\theta_0(k+1) = \theta_0(k) + \theta^*(k) - \hat{\theta}(k)\,,\quad \varepsilon_0(k+1) = \varepsilon_m(k)\,,$$

где k – номер такта регулирования. Как видно из выражений закона управления, он обладает низкой вычислительной трудоёмкостью. В нём принципиально отсутствуют операции координатных преобразований. Основные трудности в его реализации выпадают на вычисление с помощью НМ и Н значений φ_m, ε_m и m_e на каждом такте управления.

Ниже приведен график переходного процесса пуска ВД под нагрузкой с последующим реверсом (рис. 2). При этом были приняты следующие относительные параметры привода: U = 1; τ_m=0,5; τ_e = 0,05; относительное значение момента сопротивления нагрузки m_c = 0,3. На рисунке приведены графики угловых скоростей вращения ротора ε и модели ε_m (кривые практически совпадают) и увеличенное в 100 раз отклонение угла коммутации от заданного значения $\theta^* - \theta$ (ошибка не превышает 0,0025).

К преимуществам предлагаемой схемы векторного управления приводом необходимо отнести слабую чувствительность к разбросу параметров двигателя, что подтвердило компьютерное моделирование системы. Известная проблема бездатчиковых схем [3] – их чувствительность к неточности определения начального положения ротора, присуща и рассматриваемому подходу. Однако, как показало компьютерное исследование, при начальном рассогласовании фактического и желаемого углов коммутации от –1,2 до +0,1 рад система его отрабатывает. Такое рассогласование вполне может быть обеспечено предварительной электрической установкой ротора. Принципиальное решение проблемы, предложенное профессором

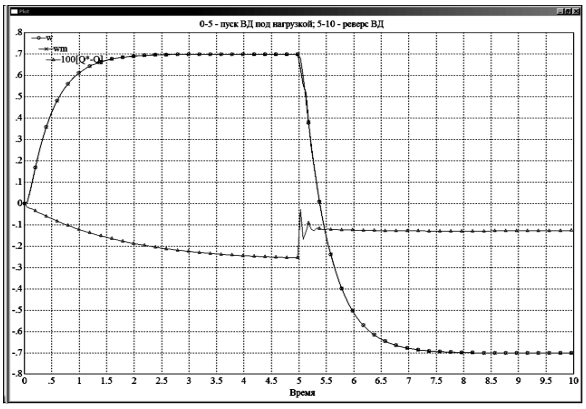


Рис. 2. Пуск под нагрузкой и реверс

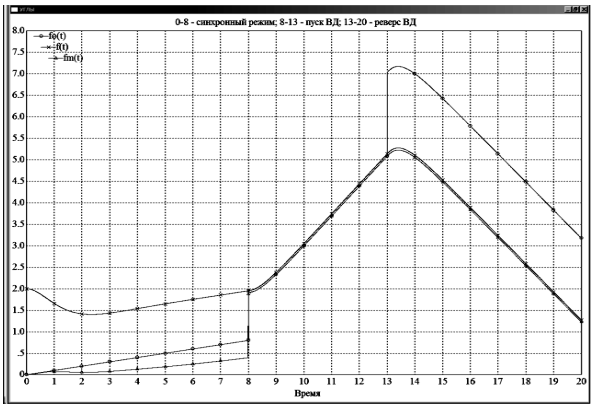


Рис. 3. Реализация синхронного режима

С.Г. Ворониным, использование при начальном пуске двигателя режима синхронного вращения с последующим после корректировки НМ переводом двигателя в позиционный режим. Синхронный режим можно также использовать для периодической корректировки НМ. Такой подход приводит к незначительному усложнению системы управления. На рис. 3 приведён пример реализации этого режима работы ВД. На графике представлены угловые координаты привода: ротора φ, ПН φ_0 и НМ φ_m. В момент времени $\tau = 8$ происходит корректировка НМ и ВД переводится в позиционный режим, в $\tau = 13$ осуществляется реверс ВД.

Библиографический список

1. Воронин, С.Г. Векторное управление электроприводом с вентильным электродвигателем / С.Г. Воронин, Д.В Коробатов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 5, № 4 (33).

2. Коробатов, Д.В. Способы реализации векторного управления вентильным двигателем / Д.В. Коробатов, Н.Ю. Сидоренко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – Вып. 6, № 9 (49).

3. Абд Эль Вхаб Амр Рефки Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами / Абд Эль Вхаб Амр Рефки, А.С. Каракулов и др. // Известия вузов: Электромеханика. – 2011. – № 6.

4. Виноградов, А. Бездатчиковый электропривод подъёмно-транспортных механизмов / А. Виноградов, А. Сибирцев и др. // Силовая электроника, 2007. – № 1.

5. Busca, Cristian Open Loop Low Speed Control for PMSM in High Dynamic Applications, 2010. – 119 с.

6. Воронин, С.Г. Определение электромагнитного момента и момента сопротивления на валу синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов и др. // Электротехника. – М: Знак, 2012. – № 2.

УДК 621.313. 333.2

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Н.Ю. Сидоренко

Представлен ряд рекомендаций, учитывающих на этапе проектирования особенности работы асинхронного двигателя с регулируемыми полупроводниковыми преобразователями частоты.

Ключевые слова: энергоэффективность, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, короткозамкнутый ротор.

Требование перехода на двигатели высокого класса энергоэффективности обосновало приоритетное использование регулируемого электропривода [1, 2]. Причём, предпочтение отдаётся двигателям переменного тока асинхронным (АД) и синхронным (СД) так как они имеют лучшие массогабаритные показатели, более высокую надежность и срок службы, проще в обслуживании и ремонте.

По некоторым оценкам [1], использование обычных серийных АД в частотном приводе приводит к снижению КПД и требует завышения их установленной мощности на 15,5–20 % при работе в установившихся режимах и до 40–45 % – в динамических режимах. Из-за высших гармоник напряжения и тока на выходе преобразователя частоты (ПЧ) на 5–6 % возрастают потери в двигателе. Становится понятным, что для частотного регулирования нужны специальные двигатели.

Особенности расчёта АД, адаптированных для работы с ПЧ основаны на следующих факторах [2, 3]:

1. Возможность плавного регулирования напряжения на выходе ПЧ позволяет исключить прямой пуск двигателя на номинальном напряжении сети.
2. Управление частотой и напряжением позволяет регулировать скорость вращения и скольжение.
3. Возможность использовать нестандартное напряжение основной гармоники на выходе ПЧ.
4. Различие в режимах регулирования АД по виду нагрузки: с постоянным моментом, с постоянной мощностью, с вентиляторной нагрузкой.
5. Наличие импульсных перенапряжений при ШИМ-коммутации в системе ПЧ-двигатель.
6. Охлаждение внешними вентиляторами из-за неэффективности встроенных при работе на малых частотах вращения.

Первый фактор в основном влияет на расчёт ротора. При проектировании двигателей с короткозамкнутым ротором [4] направленным выбором

параметров ограничивают пусковой ток до 6–7-кратного по сравнению с номинальным, а для повышения пусковых моментов используют эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. Он заключается в неравномерном распределении плотности тока по поперечному сечению стержня. Неравномерность распределения плотности тока вызывает увеличение электрических потерь в обмотке, эквивалентное увеличению её активного сопротивления, и пусковой момент двигателя возрастает. Увеличение эквивалентного сопротивления под действием эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени в стержнях, поперечное сечение которых имеет большую высоту или уменьшенную площадь верхней части по сравнению с нижней. Поэтому делают глубокопазные роторы, или стержни обмотки выполняют фигурными. Ещё больший эффект увеличения сопротивления при пуске возникает в роторах с двойной беличьей клеткой, но у таких двигателей, большое индуктивное сопротивление, что приводит к снижению максимальных моментов и ухудшению коэффициента мощности двигателя в номинальном режиме.

В схеме частотного регулирования АД не подвергается прямому пуску от промышленной сети, поэтому не требуются глубокие пазы на роторе. Это упрощает конструкцию, позволяет сделать более широкие пазы [2]. За счёт этого можно уменьшить активное сопротивление ротора, а значит и рабочее скольжение и индуктивность рассеяния, что приведёт к увеличению полезного момента и cosφ электродвигателя. Отказ от глубоких пазов утолщает спинку ротора, из-за чего снижается степень её насыщения и появляется возможность увеличения механической прочности вала.

Второй фактор. Скорость вращения АД определяется частотой питания двигателя и количеством его пар полюсов. Некоторые единые серии АД имеют машины с максимальным числом полюсов –12. Есть попытки изготовления АД для частотно-регулируемого привода лифта и рольгангов с 20 парами полюсов [2]. Увеличение числа пар полюсов для обеспечения пониженных скоростей приводит к значительному увеличению массы и снижению коэффициента мощности. Возможность получения пониженных скоростей за счёт регулирования частоты питающего напряжения и как следствие снижения числа пар полюсов (p) до разумного предела ($2p \leq 8$) улучшает коэффициент мощности и массогабаритные показатели.

Поскольку АД может работать на низких частотах, появляются дополнительные рекомендации по оптимальной геометрии магнитной системы [5]. Прежде всего, рекомендуется применение паза статора с круглым дном, форма паза ротора должна обеспечивать одинаковую ширину зубца по всей длине. При подборе оптимального соотношения чисел пазов статора и ротора во избежание больших пульсационных моментов следует отказаться от скоса пазов и традиционного соотношения $|z_s - z_p| = p$, где z_s, z_p – число

зубцов статора и ротор а соответственно. Число пазов ротора должно быть уменьшено.

Одновременное управление частотой и напряжением позволяет регулировать скольжение, а именно, поддерживать его постоянным, что минимизирует потери в роторе и повышает КПД двигателя.

Третий фактор. При широком диапазоне регулирования скорости вращения следует учитывать изменение падения напряжения в цепях ПЧ. В частности, при работе электродвигателя на высокой скорости появляется значительная индуктивная составляющая падения напряжения на обмотках ПЧ. Напряжения с выхода ПЧ становится меньше номинального. Для устранения этого недостатка расчёт номинального режима работы можно проводить на нестандартное напряжение основной гармоники на выходе ПЧ. Расчётное номинальное напряжение АД рекомендуется снижать на 15–20 % по сравнению со стандартным номинальным выходным напряжением ПЧ, тем самым обеспечивая «запас» по напряжению.

Четвёртый фактор. При проектировании они учитываются следующим образом [2]: при постоянном моменте магнитный поток будет практически постоянным при увеличении частоты и напряжения, а ток статора будет незначительно увеличиваться из-за роста потерь в стали и механических потерь. Самой тяжёлой по теплу будет работа на минимальных частотах с неё и надо начинать расчёт.

При регулировании с постоянной мощностью напряжение растет несколько медленнее, чем частота, следовательно, наибольший магнитный поток и ток будут при минимальной частоте. По нагреву это будет самый тяжелый режим и расчёт надо начинать с него.

При вентиляторной нагрузке напряжение пропорционально квадрату частоты, т. е. с их увеличением поток растёт. А полезная и потребляемая мощность практически пропорциональна кубу частоты. Следовательно, на наибольшей частоте поток и ток максимальны, и именно с этого режима надо начинать расчёт.

Следующие факторы являются негативными по сравнению с питанием от промышленной сети и требуют снижения их влияния на эффективность работы [1, 6].

ШИМ-коммутация современных ПЧ вызывает волновые переходные процессы и импульсные перенапряжения в системе ПЧ-двигатель. Характер процессов и величина перенапряжений зависят от крутизны фронтов питающих импульсов, индуктивных и емкостных параметров системы. Неблагоприятная величина перенапряжений в обмотке статора достигает двойного значения амплитуды поступающих импульсов и даже больше. Для защиты от них надо усиливать изоляцию хотя бы начальных витков обмотки.

Высокочастотная коммутация в ПЧ обусловливает появление подшипниковых токов в двигателе. Некоторые фирмы (например, ABB) предлагают использовать в частотно-регулируемых АД подшипники с изолированным внутренним или наружным кольцом, с керамическими шариками и другие меры.

Охлаждение. Из-за низкой эффективности собственных вентиляторов при работе на малых частотах двигатели должны быть снабжены автономными вентиляторами-наездниками со своим приводом. Это необходимо для охлаждения как активных частей, так и подшипников.

Рассмотренные факторы, затрагивают только малую часть вопросов, возникающих при проектировании асинхронного двигателя с частотно – регулируемым управлением, но позволят обратить внимание на их существование.

Библиографический список

1. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей энергоэффективной серии 7AVE:некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП–2012. – Иваново: ИГЭУ, 2012. – С. 13–16.

2. Беспалов, В.Я. Перспективы создания Отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // АЭП–2004, Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г. – Магнитогорск, 2004. – С. 24–31.

3. Усынин, Ю.С. Электрические машины в современных регулируемых электроприводах / Ю.С. Усынин, Н.Ю. Сидоренко // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 10. – С. 84–90.

4. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 2005. –767 с.: ил.

5. Кобелев, А.С. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий / А.С. Кобелев, Л.Н. Макаров, А.М. Русаковский // Электротехника. – 2008. – № 11. – С. 15–23.

6. Гаврилов, П.Д. Оптимальный выбор частоты, полюсности и электромагнитных нагрузок взрывозащищённых асинхронных двигателей при частотном управлении / П.Д. Гаврилов // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. – СПб., 2007. – С. 151–153.

УДК 621.314.22

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА С ШИХТОВАННЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

С.П. Лохов, А.П. Сивкова

В процессе экспериментальных исследований трансформатора с шихтованным сердечником была зарегистрирована кривая намагничивания с двумя изломами. Предложено уточнение математической модели магнитопровода, учитывающее влияние зазора на участке шихтовки. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: магнитопровод, петля гистерезиса, моделирование.

Авторами была предложена методика экспериментального определения параметров магнитопроводов, в рамках выбранной математической модели, защищенная патентом и публикацией [1, 2]. В данной работе рассматривается уточнение математической модели магнитопровода.

На установке (рис.1, а) мы снимали петли гистерезиса магнитопроводов 1 трансформаторов с компенсацией вихревых токов.

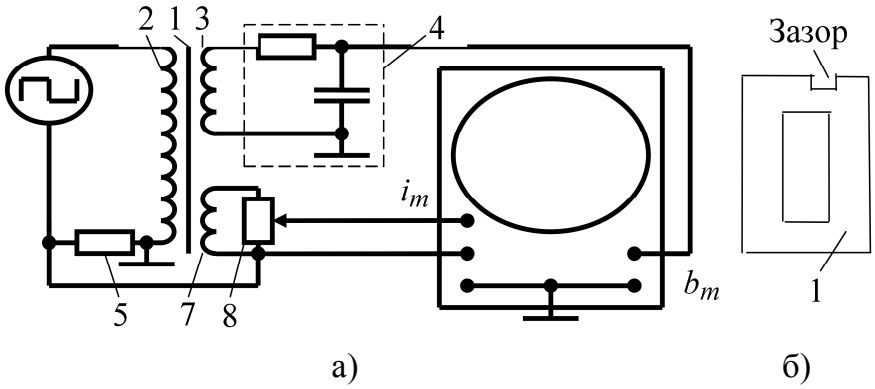


Рис. 1. Схема опытной установки (а) и модель сердечника (б)

На холостом ходу трансформатора через первичную обмотку 2 протекают токи намагничивания i_m и вихревые токи. К вторичной обмотке 3 подключено интегрирующее устройство 4 так, что на его выходе получается синал, пропорциональный индукции b_m магнитопровода. Сигнал тока снимается с шунта 5. При тороидальном равномерном по длине магнитопроводе два сигнала оказываются пропорциональными магнитной индукции и напряженности магнитного поля в нем. Мы предложили компенсировать сигнал вихревых токов сигналом с дополнительной обмотки 7, подстраиваемым по специальной методике потенциометром 8 и снимать чистый сигнал тока намагничивания.

Мы считали, что равномерность магнитопровода по длине обеспечивается его шихтованием (слой пластина + «лапша», слой «лапша» + пластина). При значительных насыщениях мы получили удивительную характеристику с двумя изломами на участках насыщения (рис. 2).

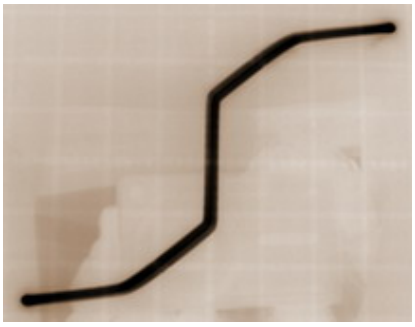


Рис. 2. Экспериментальная кривая намагничивания

Мы предположили, что на участке шихтовки получается не сплошная масса магнитного материала, а только его половина. Другую половину занимает воздушный зазор. Два таких участка можно свести к одному двойному, тогда модель сердечника шихтованного магнитопровода будет иметь вид рис. 1, б. Однако подтвердить правильность этой гипотезы может только математическое моделирование.

Сейчас самой распространенной в мире, в готовых пакетах прикладных программ (MatLab) является модель Джилса – Атертона [3], хотя гораздо лучшая модель раньше (!) предложена у нас Савиновским [4]. Идея обеих моделей одинакова – экспоненциальное приближение рабочей точки петли к некой статической кривой. Однако в модели Савиновского аргументом является индукция, а не напряженность, что гораздо удобнее для программирования. Подробнее об этом можно прочитать в [2].

Важно выбрать удобное описание упомянутой статической кривой. Савиновский использовал тангенс [4], мы нашли более удобным гиперболический синус (рис. 3) или экспоненту [2]. Удивительным оказалось для нас, что такое моделирование магнитопровода типа рис. 1, б не привело к появлению двух изломов, аналогичных тем, что видны на экспериментальной характеристике рис. 2. Тогда мы предположили, что характеристика любой удобной функции на участке насыщения должна вырождаться в прямую линию, как показано на рис. 3 после обведенной кружком точки.

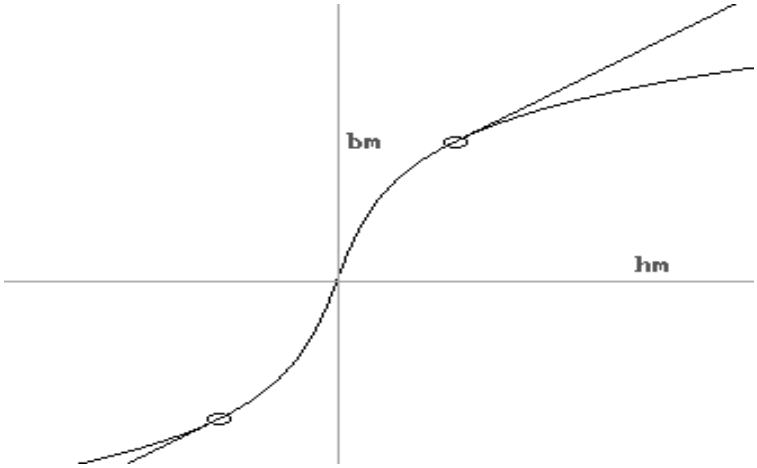


Рис. 3. Повернутый гиперболический синус и его линейное насыщение

Такое описание наконец-то привело нас к желанному виду характеристики с двумя изломами (рис. 4).

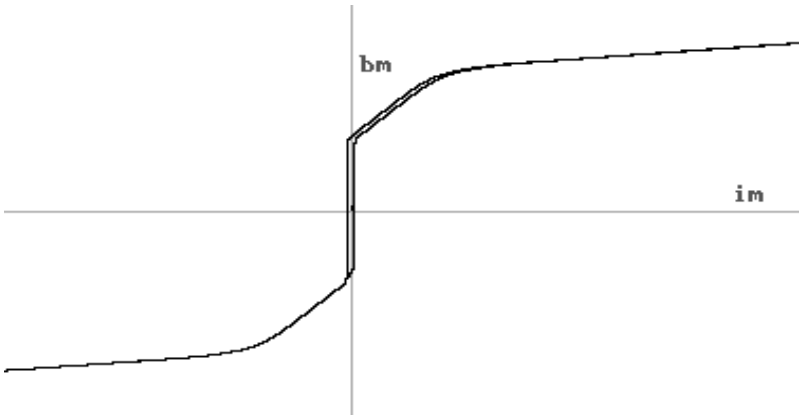


Рис. 4. Результат математического моделирования

Таким образом, мы получили два полезных для практики вывода:

1. Шихтованный сердечник является далеко не равномерным. В нем присутствует незаметный глазу незначительный половинный воздушный зазор, который определяет характеристику перемагничивания магнитопровода на довольно значительном участке изменения индукции.

2. В создаваемых моделях петли гистерезиса принципиально важно, чтобы на участках насыщения характеристики переходили в прямые линии.

При очевидности второго вывода к нему требуются пояснение. Программистам проще не делать перехода на линейный участок насыщения петли гистерезиса потому, что возникающее в этом случае сверхмалое значение магнитной проницаемости не приводит к огромным нереальным токам намагничивания, которые ограничиваются другими параметрами модели, например, индуктивностями рассеяния. Однако некоторые интересные реальные явления (см. рис. 2, 4) могут не проявиться при таком моделировании.

Библиографический список

1. Пат. 2376610 Российская Федерация, МПК G 01 R 33/14. Способ регистрации гистерезисной петли / С.П. Лохов, А.П. Сивкова. – № 2008125507/28, заявл. 23.06.2008; опубл. 20.12.2009.

2. Лохов, С.П. Распределенная модель гистерезиса с вихревыми токами / С.П. Лохов, А.П. Сивкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8. – № 20(92). – С. 27–31.

3. Новиков, А.А. Экспериментальные исследования параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса – Атертона / А.А. Новиков, С.А. Амелин // Электричество. – 1995. – № 9. – С. 46–51.

4. Савиновский, Ю.А. Основы общей теории дросселей как нелинейных ферромагнитных устройств: автореф. дис. … д-ра техн. наук / Ю.А. Савиновский. – Горький: ГПИ, 1974. – 48 с.

УДК 62-83:621.313.3

КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА В СИСТЕМЕ С ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Т.А. Козина, Д.А. Сычев

В данной статье освещены первые шаги по созданию систем управления электроприводами переменного тока с единым информационным обеспечением (ЕИО), отличающихся высокими эксплуатационными и регулировочными показателями. Дано описание примера синтеза вычислителя положения для системы импульсно-векторного управления (СИВУ) асинхронным двигателем с фазным ротором.

Ключевые слова: единое информационное обеспечение, система импульсно-векторного управления, косвенная оценка состояния.

Современное состояние электропривода характеризуется повышением уровня технологичности процессов управления и ростом требований, предъявляемых к качеству регулирования переменных состояния системы. Замкнутые системы управления позволяют увеличить точность поддержания переменных и расширить диапазон регулирования до требуемых значений. Для реализации замкнутых систем необходимо обладать информацией о действительном состоянии объектов регулирования, которую можно получать с помощью прямого измерения переменных состояния или по средствам косвенной оценки, используя доступные для прямого измерения электрические переменные системы, например, токи и напряжения [1].

В зависимости от принципов управления и требований к качеству регулирования задачи ЕИО сильно различаются. Примеры синтеза и реализации ЕИО широко рассмотрены в работах Ю.С. Смирнова, В.Г. Домрачева, А.П. Балкового [2–4]. Тем не менее, на сегодняшний день универсального решения организации ЕИО, способного удовлетворить все требования со стороны электроприводов, не существует.

Более того, имеется ряд систем электроприводов, для которых оптимальное решение ЕИО до сих пор не разработано, например, системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателями с фазным ротором и системы импульсно-векторного управления синхронной реактивной машиной независимого возбуждения СРМНВ [5–7]. В данной статье освещены первые шаги по созданию систем управления электроприводами переменного тока с ЕИО, отличающихся высокими эксплуатационными и регулировочными показателями.

На начальном этапе работы была исследована система электропривода с импульсно-векторным управлением, достаточно хорошо подходящая для

массовых механизмов с одно- и двухсменными графиками работы и невысокими требованиями к точности регулирования скорости [6, 7] – СИВУ асинхронным двигателем с фазным ротором (АД с ФР).

В данных механизмах нежелательна полная остановка электропривода, предпочтителен перевод на пониженную скорость, позволяющий экономить энергию и ресурсы. Чтобы не усложнять эксплуатацию оборудования, на электроприводы этих механизмов не следует устанавливать механические датчики (например, скорости или положения), но принцип работы СИВУ требует знания информации о положении ротора в любой момент времени. Ранее сигнал, определяющий угол поворота вала двигателя, поступал в систему управления с датчика положения ротора, непосредственно установленного на валу (абсолютного энкодера). В этой связи были рассмотрены возможности и особенности реализации электропривода с косвенным измерением положения ротора с учетом специфики работы СИВУ.

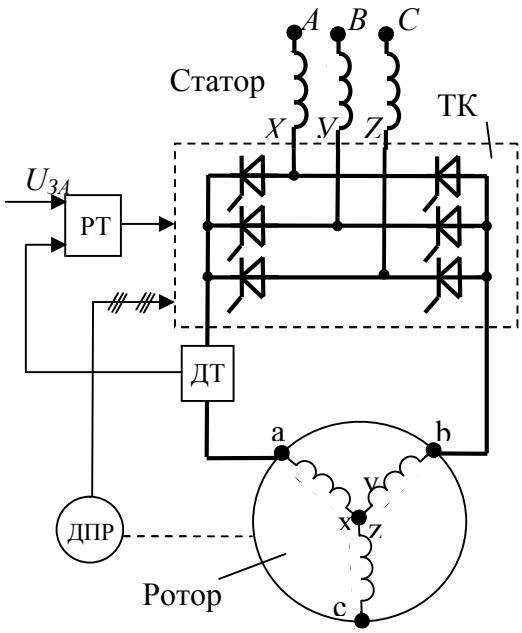


Рис. 1. Функциональная схема электропривода: ДТ – датчик тока, РТ – регулятор тока, $U_{ЗАД}$ – задающее напряжение, пропорциональное желаемому току статора

Функциональная схема СИВУ представлена на рис. 1. Обмотки *AX, BY, CZ* через тиристорный коммутатор ТК подключены к питающей многофазной сети переменного тока *A*, *B*, *C*, а на выход ТК включены обмотки ротора асинхронного двигателя *ax, by*. Обмотка *cz* может подключаться параллельно или оставаться обесточенной. Чтобы создать электромагнитный момент двигателя, в зависимости от сигнала с датчика положения ротора ДПР на два тиристора двух фаз статора асинхронного двигателя, фазную зону которых пересекает магнитная ось обмотки ротора, подаются управляющие импульсы. Вектор МДС обмоток статора перемещается в расточке статора двигателя дискретно с шагом 60°. Эти переключения производят тогда, когда ориентация векторов МДС обмоток статора и ротора соответствует двигательному моменту.

Косвенный вычислитель углового положения ротора должен в любой момент времени по доступным для прямого измерения электрическим переменным определять, в каком из шести секторов находится вектор МДС ротора и какие обмотки статора нужно подключить к ротору, чтобы создать максимальный двигательный момент (рис. 2). Обозначение *AX-YB*

(*CZ*) показывает, что ток втекает в начало обмотки статора *AX* и вытекает из начала обмотки статора *BY*, а обмотка *CZ* остается обесточенной.

В рамках решения данной задачи удалось создать вычислитель углового положения ротора в СИВУ АД с ФР, основанный на оригинальном двухэтапном способе косвенного определения положения: на первом этапе определяется начальное угловое положение ротора α_0 в условиях полной неопределенности, на втором – отслеживается текущее состояние углового положения α_T, используя информацию о предыдущих состояниях системы.

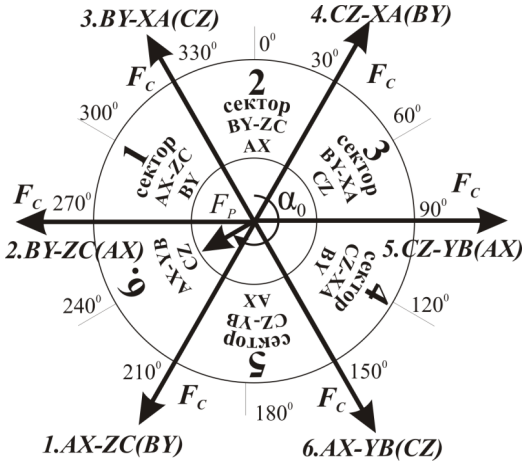


Рис. 2. Диаграмма задачи вычислителя

Предложенный вычислитель вместо измерения токов и напряжений на обмотках двигателя, сопровождающихся непрерывной математической обработкой, производит только сопоставление их величин, что существенно снижает необходимую мощность средств вычисления системы управления. Алгоритм вычисления углового положения использует специфику работы СИВУ, а именно – нетрадиционное последовательное включение обмоток статора и ротора, когда одна из обмоток статора остается обесточенной. Вычислитель позволяет корректно определять угловое положение ротора с точностью до сектора, равного 60 электрическим градусам, при сколь угодно малых скоростях вращения, включая нулевую скорость. При необходимости указанную точность можно увеличить, например, используя замкнутый интегрирующий аналого-цифровой преобразователь с бестактовым поразрядным уравновешиванием, принцип построения которого описан в [8].

В качестве примера в таблице приведены показатели качества СИВУ с косвенным определением положения (КОП) и СИВУ с ДПР для скорости вращения 0,2 от номинальной синхронной скорости ω_{0H}. Таблица содержит следующие показатели качества процессов: максимальное и среднеквадратичное значения тока силовой цепи в долях от номинального тока статора I_{max}/I_{1H} и $I_{СРКВ}/I_{1H}$; максимальный и средний электромагнитные моменты двигателя в долях от номинального момента M_{max}/M_H и $M_{СР}/M_H$; колебания скорости $\Delta\omega/\omega_{0H}$, вызванные импульсным режимом работы. Сравнение показателей качества СИВУ с КОП и СИВУ с ДПР, позволяет заключить, что СИВУ с КОП не уступает системе с непосредственным датчиком положения и превосходит ее в эксплуатационных свойствах.

Показатели качества процессов

Показатель	I_{max}/I_{1H}	$I_{СРКВ}/I_{1H}$	M_{max}/M_{H}	$M_{СР}/M_{H}$	$\Delta\omega/\omega_{0H}$
СИВУ с ДПР	2,2	0,6	3,2	0,4	0,11
СИВУ с КОП	2,5	0,6	3,3	0,5	0,12

Таким образом, ЕИО для одной из систем импульсно-векторного управления, использующее косвенный способ определения положения, было успешно разработано, что позволяет надеяться на возможность синтеза ЕИО для других систем электропривода, например, для СИВУ СРМНВ.

Библиографический список

1. Козина, Т.А. Бездатчиковые системы определения скорости и положения ротора в асинхронном электроприводе / Т.А. Козина // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – Вып. 19. – С. 43–55.

2. Домрачев, В.Г. Цифроаналоговые системы позиционирования (Электромехатронные преобразователи) / В.Г. Домрачев, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 240 с.

3. Балковой, А.П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателя / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. – М.: ИД МЭИ. – 2010. – 328 с.

4. Смирнов, Ю.С. Информационное обеспечение электромехатронных преобразователей / Ю.С. Смирнов, А.Н. Лысов, П.Б. Серебряков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16 (275). – С. 31–36.

5. Усынин, Ю.С. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 37–43.

6. Usynin, Y.S. Asynchronous electric drive with pulse-vector control / Y.S. Usynin, A.V. Valov, T.A. Kozina // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82, no 3. – P. 134–137.

7. Усынин, Ю.С. Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // Электротехника. – № 3. – 2011. – М.: ЗАО «Знак». – С. 15–19.

8. Замкнутый интегрирующий аналого-цифровой преобразователь с бестактовым поразрядным уравновешиванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Раздел «Приборы и средства автоматизации». – 2012. – № 11. – С. 27–35.

УДК 62-83:621.313.3

ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНЫЙ ПУСК СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНЫ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.М. Журавлев, Д.А. Сычев

Представлен принцип моделирования импульсно-векторной системы управления синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина независимого возбуждения, импульсно-векторная система управления, метод конечных элементов.

В основу работы синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) положена идея создания поля возбуждения в явнополюсной машине обмоткой, расположенной на статоре, если, во-первых, её витки находятся напротив межполюсного промежутка ротора и, во-вторых, обмотка имеет полный шаг [1–3]. В отличие от синхронной машины с активным ротором нет необходимости пропускать по обмоткам статора синусоидальный ток. Наиболее перспективной является идея пропускания по обмоткам прямоугольного тока. Поле возбуждения в СРМНВ регулируется независимо. В связи с этим можно проследить определённую аналогию в работе СРМНВ и двигателя постоянного тока. Сходство принципов формирования электромагнитного момента в СРМНВ и обращённой машине постоянного тока предполагает близкую картину магнитной индукции в зазорах этих двигателей, что подтверждается в [4–6].

Задача построения системы импульсно-векторного управления для СРМНВ решалась с помощью программных продуктов *ANSYS* в несколько этапов. На первом этапе была создана электромагнитная модель синхронного реактивного шестиполюсного шестифазного двигателя (рис. 1) в программном пакете *ANSYS* Maxwell. Этот программный продукт решает задачи моделирования электромагнитного поля, используя уравнения Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями и, когда это необходимо, с определенными пользователем начальными условиями, чтобы получить решение с гарантируемой единственностью [7, 8]. Maxwell позволяет решать как плоские 2*D*, так и объемные 3*D* задачи. Чтобы получить набор алгебраических уравнений, которые будут решены, геометрия задачи (в нашем случае это поперечное сечение электрического двигателя) автоматически разбивается на треугольные элементы. Все эти плоские объекты модели автоматически объединяются в сетку генератором сетки (mesher). Набор всех треугольников называется сеткой конечных элементов модели. В областях с резким пространствен-

ным изменением поля плотность сетки должна быть увеличена для более высокой точности решения. В нашем случае точность разбиения воздушного зазора была выбрана в 10 раз больше точности разбиения ротора.

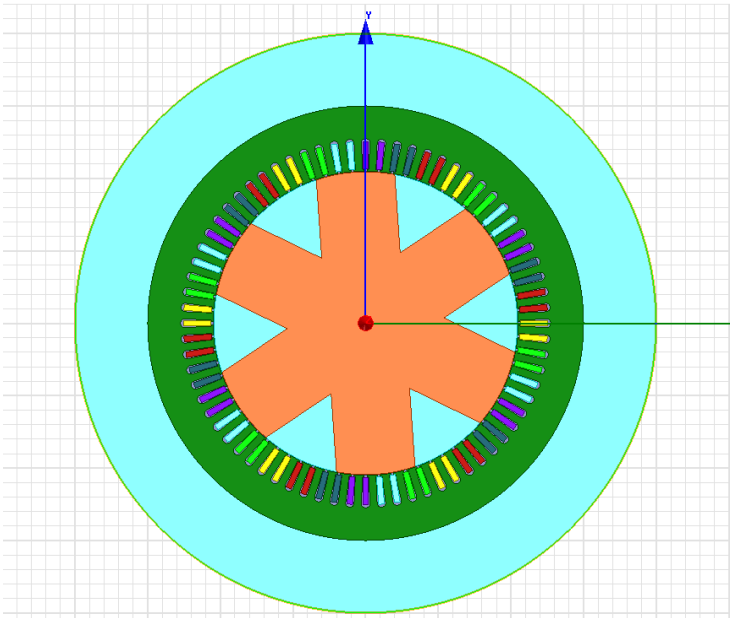


Рис. 1. Двухмерная модель СРМНВ

На втором этапе была создана математическая модель системы управления электропривода в среде Simplorer. Данное программное обеспечение позволяет легко интегрировать конечно-элементную модель двигателя, созданную в программном продукте Maxwell, где после расчета переходных процессов можно наблюдать картину полей в реальном времени. Структура модели следующая (рис. 2). Машина питается от трёхфазного неуправляемого мостового выпрямителя, дополнительно снабженного транзистором, с помощью которого осуществляется регулирование напряжения на обмотках машины. Величина этого напряжения зависит от сигнала задания $U_з$. Отпирающие импульсы на транзистор подаются в зависимости от того, какая фаза в данный момент времени должна создавать электромагнитный момент. Эта фаза определяется с помощью датчика положения ротора [9–12]. Система охвачена обратной связью по скорости. Структурный элемент T (см. рис. 2) позволяет создавать момент нагрузки.

Результатом проделанной работы стало создание математической модели электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения. На базе этой модели проводятся эксперименты с различными режимами работы электропривода: пуск и торможение электропривода на холостом ходу и под нагрузкой, наброс нагрузки. Модель позволяет изучить как статические режимы работы так и переходные процессы протекающие в системе электропривода.

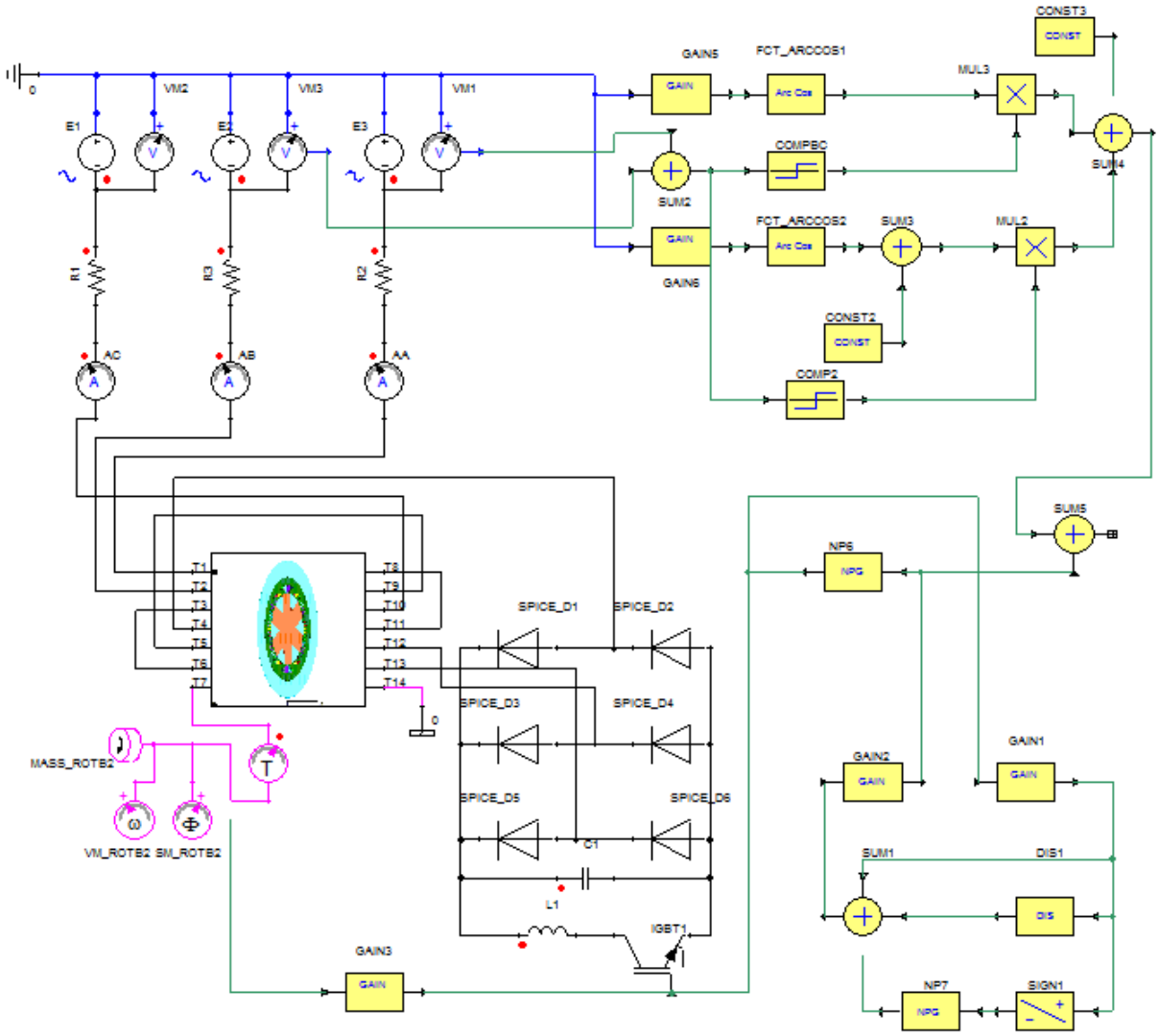


Рис. 2. Импульсно-векторная система управления СРМНВ

Библиографический список

1. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – № 3. – 2007. – С. 21–26.

2. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9, № 11 (111). – С. 52–53.

3. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12, № 34 (167). – С. 51–55.

4. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16, № 34 (251). – С. 21–27.

5. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

6. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – № 16 (275). – С. 107–110.

7. Монюшко, Н. Д. Добавочные потери на поверхности массивных полюсных наконечников явнополюсных синхронных машин: автореф. дис. канд. техн. наук // Ленинград. политехн. ин-т им. М.И. Калинина: – 1967. – 17 с.

8. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – № 37 (232). – С. 30–33.

9. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14, № 32 (208). – С. 46–51.

10. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1, № 4 (4). – С. 70–76.

11. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13, № 14 (190). – С. 47–51.

12. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – № 15 (232). – С. 40–45.

13. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК H 02 K 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин. – № 2007126685; заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

УДК 621.314

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЗОННОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

О.Г. Брылина

Рассматривается структурная схема многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя (МРП). Приведены временные диаграммы сигналов, амплитудная и модуляционная характеристики. Показаны результаты спектрального анализа выходного сигнала МРП, выполненного на базе MatLab+Simulink.

Ключевые слова: многозонный интегрирующий развертывающий преобразователь, частотно-широтно-импульсная модуляция, спектральный анализ, амплитудная и модуляционная характеристики, релейный элемент.

Как показали исследования, проведенные на кафедре электропривода ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), многозонный интегрирующий развертывающий преобразователь с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон (МРП), относящийся к классу систем с частотно-широтно-импульсной модуляцией, обладает высокими показателями помехоустойчивости и возможностью самодиагностирования и автоматического резервирования. На его основе могут быть построены элементы систем автоматики, такие как регуляторы, адаптивные фильтры, датчики обратных связей, а также СУ электроприводами с параллельными каналами регулирования, включая системы с многократным автоматическим резервированием [1].

Ниже рассматривается принцип действия МРП и дан анализ его спектральных характеристик. На рис. 1 приведена структурная схема МРП и его модель, полученная в MatLab+Simulink. В состав МРП входят сумматоры Σ1, Σ2, интегратор И с постоянной времени $T_И$ и группа релейных элементов РЭ1 – РЭn, причем в общем случае $n \geq 3$ – нечетное число. РЭ имеют симметричную относительно нулевого уровня неинвертирующую петлю гистерезиса и пороги переключения, удовлетворяющие условию $|\pm b_1| < |\pm b_2| < \ldots < |\pm b_n|$, где индекс при b соответствует порядковому номеру РЭ. Выходной сигнал всех РЭ меняется дискретно в пределах $\pm A / n$.

Модель МРП реализована для n = 3. Временные диаграммы, поясняющие работу МРП в пределах двух модуляционных зон (МЗ) [2], приведены на рис. 2. Переход МРП из одной МЗ в другую осуществляется при изменении X_{BX}. Количество МЗ «k» в МРП связано с числом «n» РЭ соотношением $k = (n+1) / 2_{|n \geq 3,5,7\ldots}$.

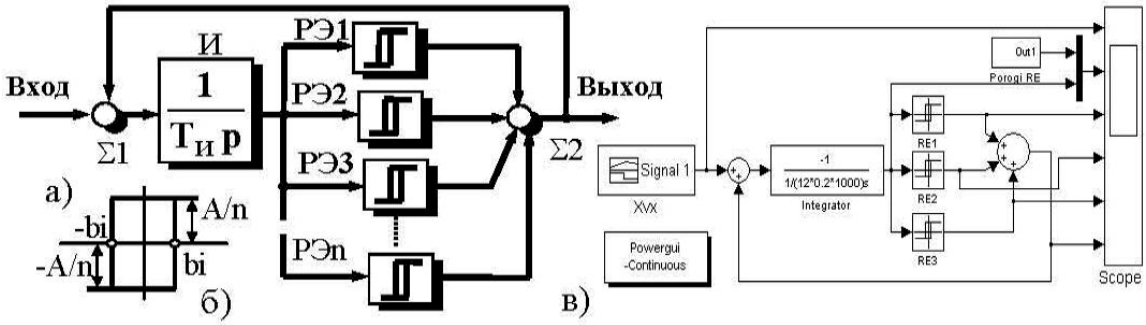


Рис. 1. Структурная схема МРП (а) и его модель в среде MatLab+Simulink (в), передаточная характеристика релейных элементов (б)

При включении МРП и $X_{BX} = 0$ РЭ2 и РЭ3 под действием сигнала $Y_И(t)$ с выхода И (рис. 2, б) устанавливаются в статические и противоположные по знаку состояния (рис. 2, г, д). МРП входит в режим устойчивых автоколебаний, когда амплитуда сигнала $Y_И(t)$ ограничена зоной неоднозначности РЭ1, имеющего минимальное значение порогов переключения (рис. 2, б, в). Выходная координата МРП формируется в 1МЗ за счет переключений РЭ1 (рис. 2, в). При этом амплитуда выходных импульсов МРП ограничена пределами $\pm A / 3$ (рис. 2, е), а их среднее значение равно нулю.

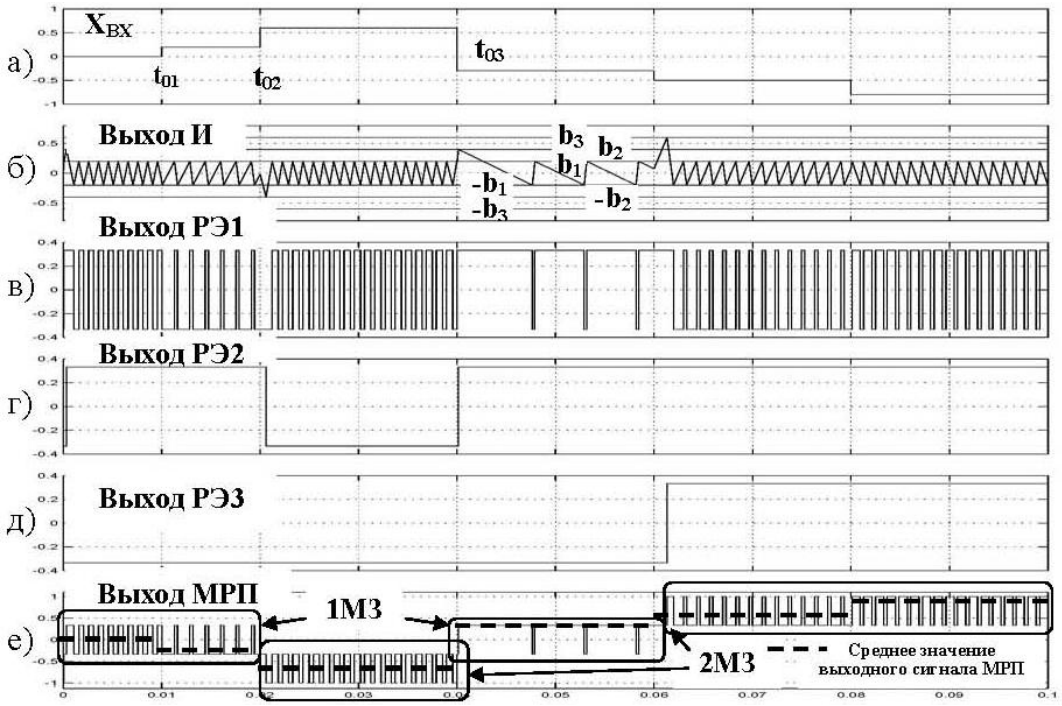


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов МРП

Наличие входного сигнала $X_{BX} < (A/3)$ (рис. 2, а, $t_0 < t < t_{01}$) влечет за собой изменение частоты и скважности выходных импульсов МРП. Среднее значение выходных импульсов МРП пропорционально величине входного сигнала X_{BX} и противоположно ему по знаку (рис. 2, е).

Предположим, что в момент времени t_{01} увеличился дискретно сигнал $(A/3) < X_{BX} < A$ (рис. 2, а). Это нарушает условия существования режима автоколебаний в 1МЗ, и в МРП начинается этап переориентации состояний РЭ2, РЭ3, который заканчивается в момент времени t_{02}, когда РЭ2 переключается в положение – А/3 (рис. 2, г). Выходной сигнал МРП достигает уровня – А (рис. 2, е) и МРП переходит во 2МЗ. При этом среднее значение на выходе МРП определяется как сумма постоянной составляющей – А/3 1МЗ и среднее значение импульсного потока 2МЗ (рис. 2, е). При подаче на вход МРП сигнала отрицательной полярности $\overline{X}_{BX} < 0$ (рис. 2, а) характер поведения МРП аналогичный, но среднее значение его выходных импульсов имеет положительный знак. Модуляционная $f_0 = f(\overline{X}_{BX})$ и амплитудная $\overline{Y}_0 = f(\overline{X}_{BX})$ характеристики МРП представлены на рис. 3.

Результаты спектрального анализа МРП представлены на рис. 4.

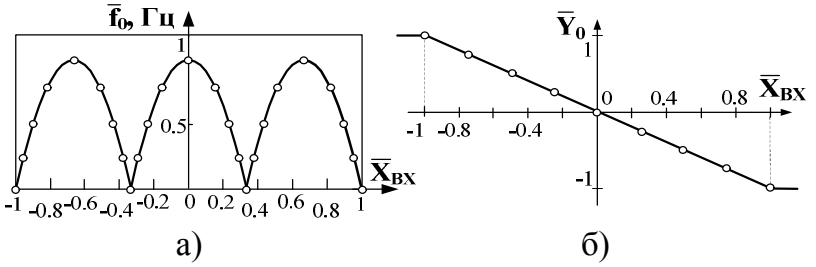


Рис. 3. Амплитудная (а) и модуляционная (б) характеристики МРП (при n = 3)

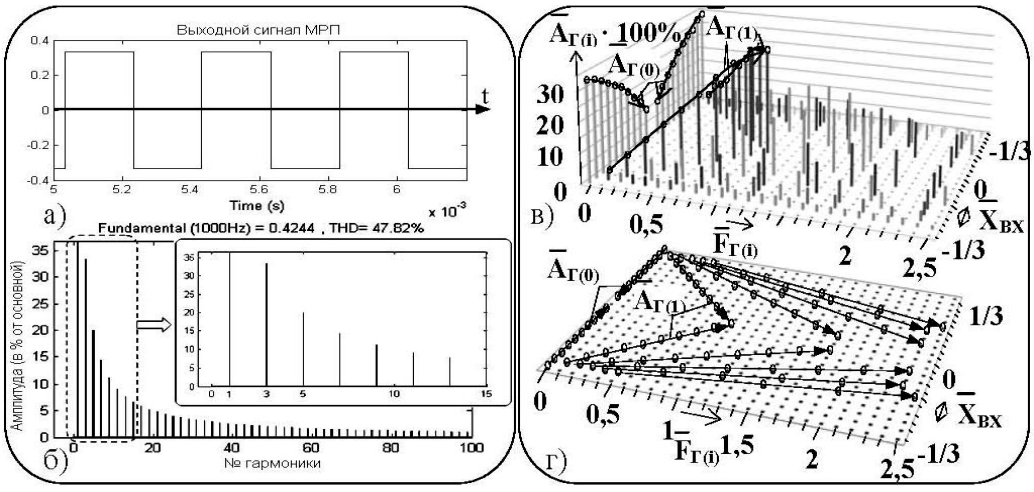


Рис. 4. Выходной сигнал (а) МРП и его частотный спектр при $\overline{X}_{BX} = 0$ (б); пространство спектра выходного сигнала МРП при изменении $\overline{X}_{BX}$ (в) и его проекция на оси ($\overline{F}_{\Gamma(i)}$, $\overline{X}_{BX}$) в пределах первой модуляционной зоны (г)

На рисунках приняты следующие обозначения: $\overline{f_0} = f_0 / f_{0|X_{BX}=0}$ – нормированная частота выходных импульсов МРП; $\overline{X}_{BX} = X_{BX} / |A|$ – нормированное значение входного сигнала; $\pm A$ – максимальная амплитуда вы-

ходных импульсов МРП; $\overline{Y}_0 = Y_0 / |A|$ – нормированное среднее значение Y_0 выходных импульсов МРП за период их следования; $\overline{A}_{\Gamma(i)} = |A_{\Gamma(i)} / A|$ – нормированная амплитуда $A_{\Gamma(i)}$ i-й гармоники выходного сигнала МРП; $\overline{F}_{\Gamma(i)} = \left| f_{\Gamma(i)} / f_{0|\overline{X}_{BX}=0} \right|$ – нормированные значения частоты $f_{\Gamma(i)}$ i-й гармоники выходного сигнала МРП; $f_{0|\overline{X}_{BX}=0} = T^{-1}_{0|\overline{X}_{BX}=0}$ – частота выходных импульсов МРП при нулевом значении сигнала на входе МРП.

Выводы

1. Уровень и частотный спектр гармоник выходного сигнала МРП зависит от постоянной составляющей на информационном входе $\overline{X}_{BX}$ (рис. 4, б, в), под действием которой меняется частота $\overline{f}_0$ автоколебаний на выходе МРП (рис. 3, а). С ростом $\overline{X}_{BX}$ и соответствующим снижением $\overline{f}_0$ (рис. 3, в), происходит пропорциональное увеличение амплитуды нулевой гармоники $\overline{A}_{\Gamma(0)}$ (рис. 3, а) и одновременное уменьшение первой гармоники $\overline{A}_{\Gamma(1)}$ (рис. 3, а). Огибающая по максимумам гармоник $\overline{A}_{\Gamma(0)}$ и $\overline{A}_{\Gamma(1)}$ описывает часть ветви параболы в соответствии с рис. 4, в;

2. В «середине» каждой МЗ (рис. 3, а $\overline{X}_{BX} = 0$ или $\pm 0,66667$), частота автоколебаний МРП имеет максимальное значение (рис. 3, б). Здесь спектральный состав выходного сигнала МРП содержит все нечетные гармоники, монотонно убывающие по амплитуде:

$$\overline{A}_{\Gamma} = \frac{4A}{\pi n}(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega t) + ... + \frac{1}{n} \cdot \sin(n\omega t)).$$

Здесь $\omega = 2\pi \overline{f}_0$ – угловая частота сигнала на выходе МРП.

3. Для МРП с произвольным числом релейных элементов (**n**) нормированная частота выходных импульсов определяется в соответствии с выражением $\overline{f}_0 = f_0 / f_{0|\overline{X}_{BX}=0} = \left(2Z_i - 1 - n\overline{X}_{BX}\right)\left(n\overline{X}_{BX} - 2Z_i + 3\right)$.

Характерной особенностью МРП является уменьшение с ростом $\overline{X}_{BX}$ по параболическому закону частоты выходных импульсов $\overline{f}_0$ МРП (рис. 3, а), в результате чего весь частотный спектр гармоник смещается вправо по оси частот $\overline{F}_{\Gamma(i)}$.

Библиографический список

1. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 8–15.

2. Кобзев, А.В. Многозонная импульсная модуляция: Теория и применение в системах преобразования параметров электроэнергии / А.В. Кобзев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1979. – 300 с.

УДК 544; 53.02

ВОЗМОЖНЫЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМОВ НА ИХ ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НА ПРОЦЕССЫ В ЯДРЕ

С.П. Лохов

Автор продолжает развивать свое объяснение экспериментов многих ученых, которые объясняют их холодным синтезом новых элементов. Изменение химических свойств происходит за счет перестройки внутренних электронных слоев атома с возможным захватом других положительных частиц. Новые внутренние электронный слои могут вызвать резонансные явления в ядре, повлиять на его распад, т. е. на радиоактивность. Теория рассеяния частиц силами ядерного отталкивания могла быть построена и на силах притяжения.

Ключевые слова: холодный синтез, научная алхимия, перестройка внутренних электронных оболочек, резонанс внутри ядра.

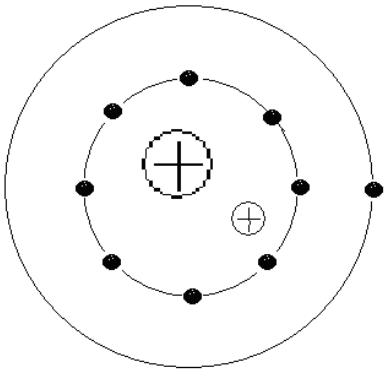


Рис. 1. Вариант алхимической модели атома

Читать эти тезисы 65-й конференции желательно после чтения тезисов 63-й конференции [1], что доступно сотрудникам ЮУрГУ. Там высказана гипотеза, что образование новых элементов под действием несильных электромагнитных полей (электрический разряд в воде) происходит не благодаря выставленному физиками на посмешище «холодному термоядерному синтезу», а благодаря перестроению внутренних электронных оболочек атомов с возможным захватом дополнительных ядер (или других положительных частиц). В итоге возможны конструкции, непохожие ни на атом, ни на молекулу (рис. 1). Здесь черные точки – электроны корпускулярной модели атома Бора. Помеченные плюсом – ядра или положительно заряженные частицы (протоны, мезоны), которые по планам ученых должны были слиться термоядерным синтезом, но не смогли преодолеть силы отталкивания ядра и застряли внутри атома. Существуют же в макромире двойные и тройные звезды, почему бы не предположить подобное в микромире? Возможны другие варианты слияний [1, 2]. Химические свойства полученного «алхимического» атома будут определять только наружные валентные электроны. Мы можем получить известные нам элементы, но они будут странными для нас. Мы можем получить «не совсем золото».

Так я ввел термин «научная алхимия» – физика или химия внутренних электронных оболочек с изменением внешних химических свойств с возможным получением сложных атомов.

Два года назад я написал бы отрицательную рецензию на такие тезисы, посоветовал бы авторам внимательнее читать школьный курс физики. Потом я изменил свое мнение [1]. Только практика правит курсы прикладных наук. Вспомним столетнее утверждение о завершении курса физики, когда оставалось только разобраться с опытами Беккереля и Герца. Для меня сейчас таковыми стали опыты наших ученых [3–5] и итальянца Андреа Росси. – Наберите их фамилии в Интернете, и вам станет обидно, как опять много говорят плохого и хорошего о достижениях зарубежной науки и практики, но ничего про наши успехи и неудачи! Удивительно, что комиссии по борьбе с лженаукой (холодным синтезом) физики создали в Москве и в Болонье. – Как стыдно им потом будет! Мое возможное объяснение этим реальным феноменам описано выше [1], оно заявлено в отказанной мне заявке на патент [2].

Наши пионеры не только держат удар физиков РАН, но и продолжают свои эксперименты. Они обнаружили, что слабые электромагнитные воздействия влияют на радиоактивность элементов [5]! И опять у Лохова есть свое объяснение чужому феномену, чему и посвящены эти тезисы.

Проведем аналогию микро- и макропроцессов. Вокруг звезды вращаются ничтожные в сравнении с ней по массе планеты. Они вызывают ничтожные приливные процессы в звезде. Но в звезде возникает резонанс этих процессов, которые могут пойти или так, или наоборот из-за ничтожного воздействия планет. Периодичность процессов в Солнце ученые часто связывают с действием на него планет.

У радиоактивных элементов есть период полураспада ядер. Я, как автоматчик, тут же говорю: «Ба! Да у них внутри происходят какие-то резонансные процессы! Я не знаю какие, но по всем внешним симптомам они происходят! С какой-то вероятностью процессы раскачивают ядро так, что оно распадается!» А дальше все очень просто: достаточно маломощного воздействия на мощный резонансный процесс, чтобы развернуть его в любую сторону. Осталось ответить на вопросы: «Как и чем воздействовать на ядро? В какую сторону и как повернуть процессы? Как назвать эти новые явления?» Вариантов ответов так много, что только новой науке «Научная алхимия» этим и заниматься.

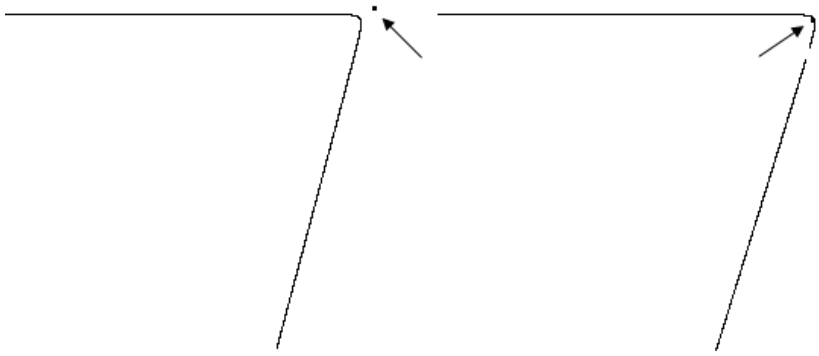
Первое, что приходит на ум: «Слабые электромагнитные воздействия ускоряют внутренний резонанс, и ядро скорее распадается…» Как назвать такое явление? – «Холодный анализ или управляемый холодный распад». Так размышления над «холодным термоядерным синтезом» привели нас к противоположному «анализу». Такой процесс может произойти непосредственно от электромагнитного воздействия, но и опосредовано – через ал-

химическое перестроение внутренней электронной оболочки, которая затем будет иначе воздействовать на ядро. Да и близость инородной частицы (см. рис. 1) должна сказаться.

Но это слабое внешнее воздействие может и ослабить внутренний резонанс. Тогда радиоактивность элемента уменьшиться.

Наконец, каждому явлению может быть антиявление. При распаде (анализе) что-то выбрасывается из ядра. – Нейтральное, положительное или отрицательное (бета-распад). Следует допустить возможность обратного захвата ядром этого чего-то внешнего.

Еще раз. Слабым электромагнитным воздействием создается алхимическая конструкция типа рис. 1. Маленькая частица не может слиться с крупной из-за сил отталкивания, а температуры для преодоления этих сил недостаточно. Близость частицы к главному ядру вызывает в ядре резонансные процессы. Процессы развиваются, что приводит к захвату маленькой частицы ядром, или к выбросу чего-то из ядра. – Да, это же и будет осмеянный физиками «холодный термоядерный синтез»!? – Не совсем так из-за нового механизма его протекания, но в итоге он и будет!



а) б)

Рис. 2. Траектория полета легкой частицы к отталкивающей (а) и притягивающей (б) тяжелой частице, показанной стрелкой

Вам что-то не нравится в таком примитивном объяснении в эпоху почти общепризнанной стандартной модели элементарных частиц, которую мало кто понимает, но испытывает трепет перед ней? А эта модель создавалась через подбор математических формул под базовые примитивные эксперименты. Нам не дано наблюдать процессы внутри атома и ядра, но мы фиксируем внешние проявления этих процессов. Таким базовым экспериментом было наблюдение рассеяния частиц атомами в опытах Резерфорда (рис. 2, а). Любой увидит в эксперименте действие сил отталкивания. Такой получается траектория при моделировании движений частиц законами Ньютона при отрицательной гравитационной постоянной. При смене знака этой постоянной мы получаем траектории рис. 2, б, отличить

которые от рис. 2, а на расстоянии невозможно. Значит даже один эксперимент Резерфорда позволяет нам строить теорию элементарных частиц на силах отталкивания и упущенную антитеорию – на силах притяжения!

Сейчас мне представляется, что эксперимент наших пионеров [5] дает нам шанс нового прорыва в теоретической физике. Если экспериментаторы не допустили элементарной ошибки, то последствия эксперимента должны превзойти последствия эксперимента Резерфорда. Авторы еще сами не осознали, что они обнаружили!

Я же предоставляю читателям только некоторые возможности такого прорыва. Я не уверен в правоте своих предположений, но нахожу их полезными.

Библиографический список

1. Лохов, С.П. Холодный синтез элементов и упущенное объяснение / С.П. Лохов // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й науч. конф. Секции технических наук. – Челябинск: Издат.центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 109–203.

2. Пат. 2010108446/07. G 21 G 1/00. Способ получения элементов преобразованием атомно-молекулярного строения исходного вещества воздействием на него полей / С.П. Лохов. – Заявл. 09.03.10; опубл. 20.09.11.

3. Пат. 2096846 РФ, МКИ G 21 G 1/00, H 05 H 1/24. Способ получения элементов и устройство для его осуществления / А.В. Вачаев, Н.И. Иванов, А.Н. Иванов и др. – заявл. 31.05.94 // Изобретения. – 1997. – № 32. – С. 369.

4. Кузнецов, Г.Ф. О возможности получения энергии при электрических разрядах / Г.Ф. Кузнецов, Д.Г. Клещев, В.В. Крымский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13, № 14 (190). – С. 73–77.

5. Пат. 2319237 РФ, МПК7 G 21 F 9/04. Способ обработки радиоактивных растворов и установка для его осуществления / В.В. Крымский, В.Ф. Балакирев, В.А. Батурин, С.Д. Ваулин, А.П. Грешников. – № 2006121115/06; заявл. 13.06.2006; опубл. 10.03.08, Бюл. № 7.

УДК 621.314.632

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

М.М. Дудкин

Рассмотрены принципы построения и временные диаграммы сигналов развертывающих преобразователей (РП) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), применяемые в аналоговых и цифровых системах управления вентильными преобразователями. На основе математического моделирования в среде *MatLab+Simulink* выполнен сравнительный анализ динамических спектральных характеристик РП различных классов. Доказана высокая помехоустойчивость интегрирующих РП с ШИМ.

Ключевые слова: развертывающий преобразователь, широтно-импульсная модуляция, спектральные характеристики, помехоустойчивость, вентильный преобразователь.

Проблема помехоустойчивости и электромагнитной совместимости вентильного электропривода была и остается одной из самых сложных в техническом плане задач, требующих своего комплексного решения [1].

В настоящее время в системах управления силовыми ВП в основном применяются развертывающие преобразователи (РП) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) на основе выборки мгновенных значений [2], которые обладают крайне низкой помехоустойчивостью и, как следствие, приводят к сбоям в работе регулируемых электроприводов и технологических установок на их основе.

Поэтому с целью выявления наиболее помехоустойчивого принципа построения РП, был проведен анализ динамических спектральных характеристик развертывающих систем в широком частотном диапазоне, включая область частот замедленной дискретизации (ОЗД) сигнала помехи [3].

РП с ШИМ первого рода (ШИМ-1) (рис. 1, а) содержит генератор пилообразного напряжения ГПН, формирующий сигнал развертки $Y_{И}(t)$ с линейно нарастающим и дискретным фронтами, сумматор Σ и релейный элемент с безгистерезисной характеристикой [2]. В РП с ШИМ-1 происходит непосредственное сравнение сигнала развертки $Y_{И}(t)$ с информативным входным воздействием $X_{ВХ}$ и формированием в момент их равенства длительности импульса открытого состояния силового ключа ВП.

РП с ШИМ-2 [2] имеет структуру (рис. 1 б), аналогичную РП с ШИМ-1 (рис. 1, а), и отличается от последнего только формой сигнала развертывающей функции, которая представляет собой симметричную относительно нулевого уровня «пилу».

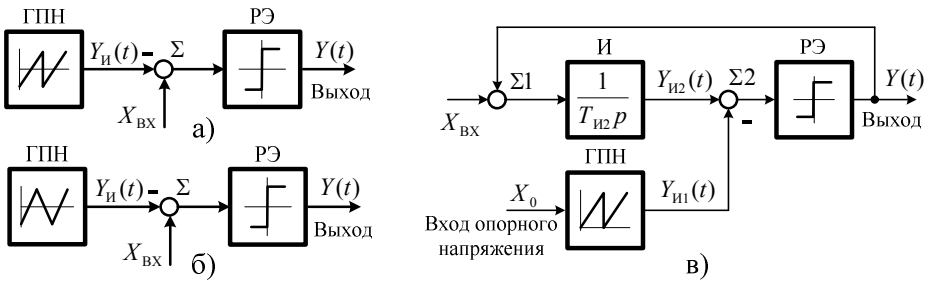


Рис. 1. Функциональные схемы РП с ШИМ-1 (а), РП с ШИМ-2 (б) и ИРП с ШИМ-1 (в)

Интегрирующий РП с ШИМ (ИРП с ШИМ) представляет собой замкнутую автоколебательную систему (рис. 1, в) [4], состоящую из сумматора Σ1, интегратора И с постоянной времени $T_{И2}$, сумматора Σ2 и релейного элемента РЭ с безгистерезисной характеристикой (рис. 1, в), а также генератора пилообразного напряжения ГПН, выполняющего роль источника сигнала несущей частоты с линейно нарастающим и дискретным фронтами в ИРП с ШИМ-1 и с симметричной относительно нулевого уровня «пилой» в ИРП с ШИМ-2.

При исследовании спектральных характеристик на информационный вход РП одновременно подавался сигнал управления $X_{ВХ}(t)$ и переменный гармонический $X_П(t)$ сигнал с постоянной амплитудой $A_П$ и переменной частотой $(T_П)^{-1}$ в широком частотном диапазоне. Выделение средней составляющей Y_0 выходных импульсов РП производилось с помощью цифрового фильтра (ЦФ).

Уровень гармоник и их частота измерялись спектроанализатором на выходе РП с учетом ЦФ при помощи программы *MatLab+Simulink*. Результаты исследований представлены в виде пространств динамических спектральных состояний $\overline{A}_Г = f(\overline{F}_Г, \overline{F}, \overline{A}_П = 0{,}1)$. Здесь $\overline{A}_Г = |A_Г / A|$, $\overline{F}_Г = |f_Г / f_0|$ – нормированная амплитуда и частота гармоник выходного сигнала РП соответственно; $\overline{A}_П = |A_П / A|$, $\overline{F} = |f_П / f_0|$ – нормированное значение амплитуды $A_П$ и частоты $f_П$ сигнала помехи (динамического входного сигнала) соответственно; f_0 – несущая частота импульсов на выходе РП.

На рис. 2 приведены динамические спектральные характеристики $\overline{A}_Г = f(\overline{F}_Г, \overline{F}, \overline{A}_П = 0{,}1)$ РП различных классов при $\overline{X}_{ВХ} = 0$, на основании которых можно сделать следующие выводы:

- Для всех РП с ШИМ (рис. 1) наибольший уровень гармоник при воздействии гармонической помехи $X_П(t)$ в широком частотном диапазоне проявляется на двух частотах:

$$\overline{F}_{Г1} = \overline{F} - n \quad \text{и} \quad \overline{F}_{Г2} = (n+1) - \overline{F}, \tag{1}$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$ – целое число.

- В РП с выборкой мгновенных значений и ШИМ-1, 2 рода (рис. 1, а, б) в ОЗД ($\overline{F} > 0{,}5$) наблюдается высокий уровень гармоник $\overline{A}_Г$ (рис. 2, а, б),

соизмеримый с амплитудой $\overline{A}_{\text{П}}$ входного гармонического сигнала $X_{\text{П}}(t)$. В окрестности частот, примыкающих к точкам $\overline{\text{F}} = 1, 2, \ldots$, импульсная система переходит в режим формирования инфранизкочастотных сигналов, частота которых определяется в соответствии с выражением (1), а ее уровень зависит от принципа развертывающего преобразования, заложенного в РП. Так, например, при $\overline{X}_{\text{ВХ}} = 0$ и частоте сигнала помехи $\overline{F} = 2{,}1$ на выходе РП с ШИМ-1 и ШИМ-2 формируются низкочастотные составляющие с частотой $\overline{F}_{\Gamma} = 0{,}1$ и с амплитудой практически равной $\overline{A}_{\text{П}}$ входного гармонического сигнала $X_{\text{П}}(t)$ (рис. 2, а, б). В результате преобразованный низкочастотный сигнал оказывается в зоне рабочих частот системы управления ВП, что приводит к его неработоспособности, либо резкому ухудшению показателей качества процесса регулирования [4].

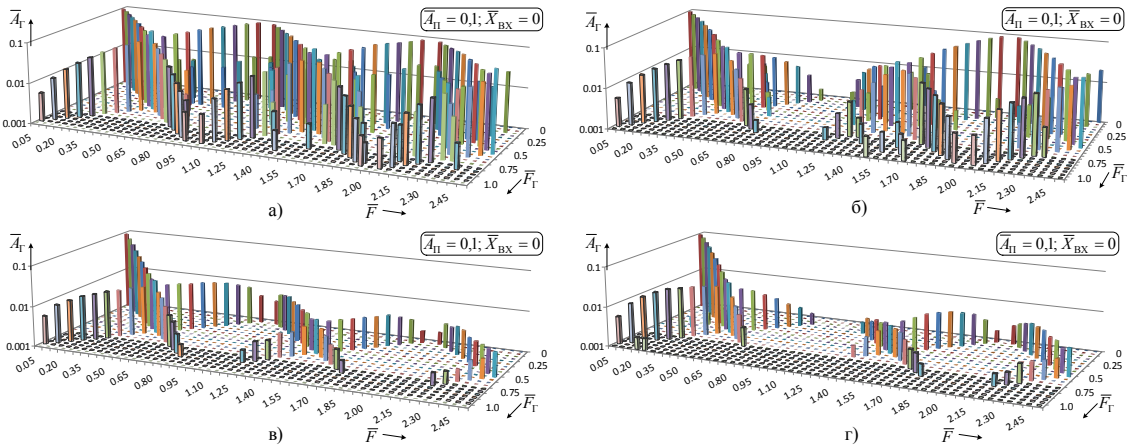


Рис. 2. Пространства динамических спектральных характеристик $\overline{\text{A}}_{\Gamma} = \text{F}(\overline{\text{F}}_{\Gamma}, \overline{\text{F}})$ для РП с ШИМ-1 (а); РП с ШИМ-2 (б); ИРП с ШИМ-1 (в) и ИРП с ШИМ-2 (г)

➢ В отличии от развертывающих преобразователей с выборкой мгновенных значений сигнала управления (рис. 1, а, б) в интегрирующих РП (рис. 1, в) в ОЗД амплитуды гармоник $\overline{A}_{\Gamma}$ монотонно убывают с ростом частоты сигнала помехи $\overline{F}$ (рис. 2, в, г), что объясняется наличием интегратора в прямом канале регулирования и замкнутым характером структурной схемы. Все это однозначно свидетельствует о высокой помехоустойчивости интегрирующих РП и говорит о целесообразности их применения в системах управления ВП с высоким уровнем помех в каналах передачи информации.

Результаты сравнительного анализа динамических спектральных характеристик РП различных классов представлен в виде зависимостей $\overline{A}_{\Gamma.\max} = F(\overline{F}, \overline{A}_{\text{П}} = 0{,}1)$ при $\overline{X}_{\text{ВХ}} = 0$ (рис. 3). Здесь $\overline{A}_{\Gamma.\max} = \left| A_{\Gamma.\max} / A \right|$ – нормированное значение максимальной амплитуды гармоники на пространстве динамических спектральных характеристик при наличии ЦФ на выходе.

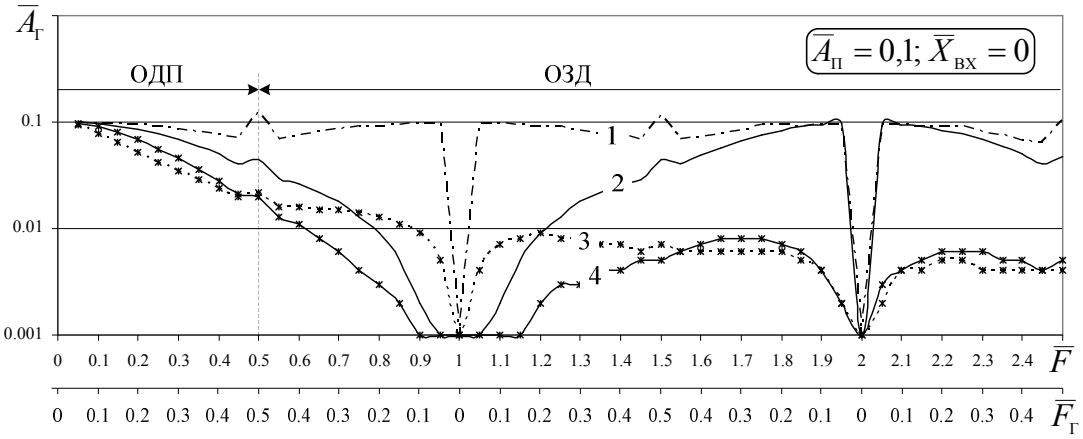


Рис. 3. Графики зависимостей максимальной амплитуды гармоник $\overline{\text{A}}_{\Gamma.\max} = \text{F}(\overline{\text{F}}, \overline{\text{A}}_{\Pi} = 0{,}1)$ для РП различных классов при $\overline{\text{X}}_{\text{ВХ}} = 0$ (1 – РП ШИМ-1; 2 – РП с ШИМ-2; 3 – ИРП ШИМ-1; 4 – ИРП с ШИМ-2 ($\overline{\text{T}}_{\text{И2}} = 2{,}5$))

Результаты исследований (рис. 3) позволяют сделать выводы:

- По характеру поведения в ОЗД и степени помехоустойчивости РП с выборкой мгновенных значений сигнала управления (рис. 1) обладают высоким уровнем гармоник $\overline{A}_{\Gamma.\max}$, соизмеримым с амплитудным значением $\overline{A}_{\Pi}$ гармонического входного воздействия и частотой, стремящейся к нулю в точках со значениями $\overline{\text{F}} = 1, 2, \ldots$ (рис. 3).
- Из всех классов РП с выборкой мгновенных значений наибольшим уровнем гармоник $\overline{A}_{\Gamma.\max}$ в ОЗД обладает РП с ШИМ-1 (рис. 3).
- Для интегрирующих РП в ОЗД уровень гармоник $\overline{A}_{\Gamma.\max}$ практически на один порядок ниже, чем для РП с выборкой мгновенных значений (рис. 3), причем их уровень монотонно снижается по мере роста частоты сигнала помехи $\overline{F}$.

Библиографический список

1. Осипов, О.И. Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин. – М.: Энергия, 1979. – 80 с.

2. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ие, 1986. – 248 с.

3. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.

4. Дудкин, М.М. Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями: моногр. / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 362 с.

УДК 62-83::621.313.3

СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.Е. Бычков, С.Н. Золотушкин

В статье рассматриваются структуры и алгоритмы управления синхронными реактивными машинами независимого возбуждения (СРДНВ), позволяющие повысить регулировочные характеристики электропривода и заметно снизить пульсации электромагнитного момента в электроприводах подобного типа.

Ключевые слова: пульсации электромагнитного момента, синхронные электроприводы, электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

В СРДНВ при повороте ротора происходит коммутация токов статора, что вызывает пульсации электромагнитного момента. Угловая характеристика двигателя $M = f(\beta)$, снятая при фиксированном значении тока в обмотках статора, имеет два периода на оборот (рис. 1, кривая 2).

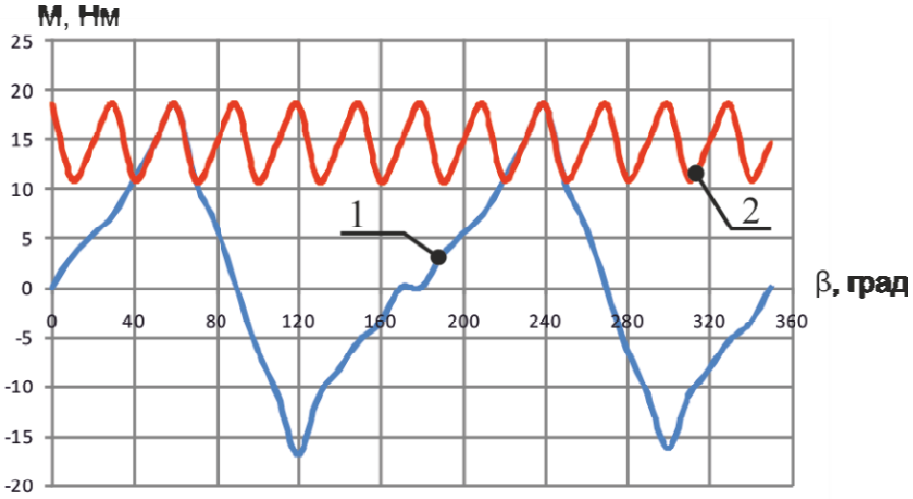


Рис. 1. К пояснению пульсаций момента СРДНВ

При вращении ротора обмотки последовательно переключаются и переходят из зоны возбуждения в зону якоря, а кривая электромагнитного момента в функции угла β поворота ротора идет по огибающей семейства угловых характеристик, смещенных друг относительно друга на величину фазной зоны, которая для 6-фазной машины равна 30˚ (рис. 1, кривая 2) [1]. Максимальное значение пульсаций в разомкнутой схеме для шестифазного двигателя может достигать 20 % от развиваемого электромагнитного момента. Помимо этого при питании СРДНВ от вентильного преобразо-

вателя из-за конечного быстродействия как самого вентильного преобразователя, так и элементов системы управления, исходная картина пульсаций (см. рис. 1) будет искажаться, что может привести к дальнейшему увеличению амплитуды пульсаций. Поэтому при разработке системы управления необходимо выработать меры по борьбе с пульсациями. В современной литературе вопросы пульсаций электромагнитного момента в вентильных электроприводах рассмотрены без указания конкретных методик по учету этого явления [2]. Отсутствуют также практические рекомендации по подавлению этого явления и борьбе с ним.

В литературе по СРДНВ одним из основных допущений в большинстве исследований [3] является то, что ток в фазе переключается мгновенно. В качестве отправной точки будем считать, что при оптимальной настройке электропривода и конечном числе фаз m (исходя из предыдущего эксперимента $m = 6$) амплитуда пульсаций зависит от времени переключения фазного тока в каждой из обмоток и от его величины. Наиболее остро этот вопрос встает при питании обмоток статора прямоугольной формой тока, так как в этом случае фронт изменения тока при переключении наиболее крутой. В дальнейшем будем считать, что время переключения есть время нарастания тока от нуля до заданного амплитудного значения при отдельно взятом переключении фаз. На рис. 2 показан вид осциллограммы двух токов фаз в момент переключения. Здесь время запаздывания T_1 показывает программную задержку между переключениями, обусловленную быстродействием и правильностью работы узла формирования фазных токов (УФФТ); время нарастания T_2 показывает время нарастания тока в фазе, определяемое быстродействием контура регулирования тока. Для достижения минимума пульсаций электромагнитного момента необходимо добиться минимального значения обозначенных постоянных времени. Данное обстоятельство требует увеличения быстродействия системы управления и, в частности, контура регулирования тока. С другой стороны, существует возможность скомпенсировать «провал» момента, если перед переключением искусственно завысить величину тока фазы.

Для снижения влияния пульсаций электромагнитного момента было предложено использовать гибкую положительную корректирующую обратную связь по току фазы (рис. 3), реализованную программным путем внутри микроконтроллера системы управления. Функционально подобная связь работает по следующему алгоритму: при достижении ротором положения, близкого к положению переключения, на вход КРТ подается дополнительный сигнал коррекции $U_К$. При достижении ротором положения переключения корректирующая связь отключается.

Чтобы отследить влияние времени запаздывания тока в фазе T_1 на пульсации электромагнитного момента будем, экспериментально изменять быстродействие КРТ, тем самым изменяя время запаздывания тока. При этом

будем фиксировать среднее значение момента на валу СРДНВ с помощью нагрузочной машины. Ввиду того, что одним из начальных условий экспериментов принималась оптимальная настройка КРТ, будем изменять время запаздывания T_1 от 1 мс (рис. 4) до 50 мс.

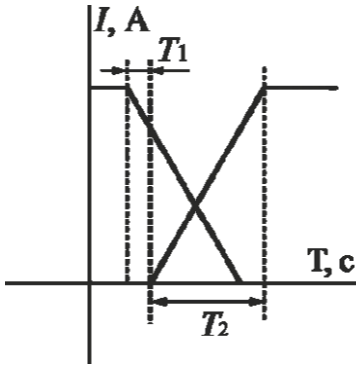


Рис. 2. К определению времени переключения тока СРДНВ

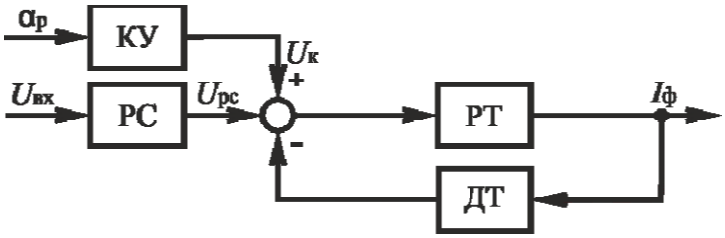


Рис. 3. Структурная схема корректирующей связи

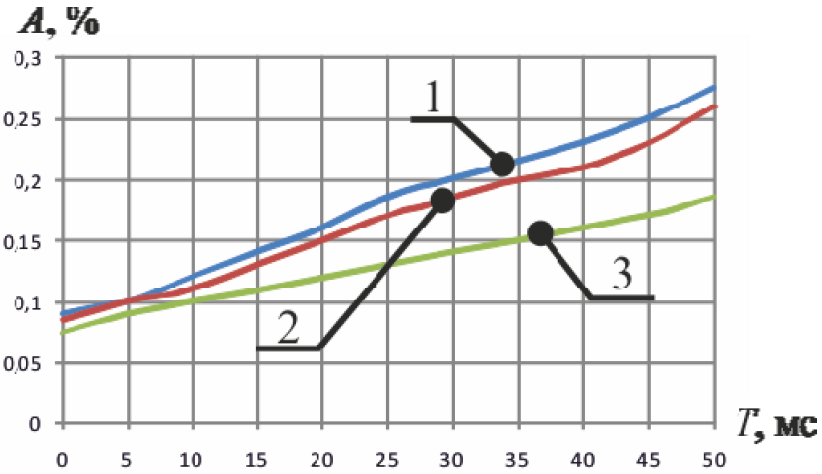


Рис. 4. Зависимость амплитуды пульсации момента на валу от времени запаздывания тока

Рассмотрена зависимость амплитуды первой гармоники пульсаций A от времени запаздывания T_1. Сопоставлялись три варианта работы электропривода: в первом варианте корректирующая связь отсутствовала (рис. 4, кривая 1), во втором случае корректирующая связь воздействовала только на отключаемый период тока (спадающий фронт) (рис. 4, кривая 2), в третьем случае корректирующая связь воздействовала и на ниспадающий фронт и на нарастающий фронт (рис. 4, кривая 3).

При времени переключения до 5 мс амплитуда пульсаций момента проявляется незначительно, но ко времени переключения, равного 50мс, значение пульсаций достигает ощутимого значения и может привести к некачественной работе электропривода. Это полностью подтверждает гипотезу об увеличении пульсаций момента при неидеальной работе КРТ.

Учитывая, что время переключения тока зависит от быстродействия контура регулирования тока и, принимая, что максимальное значение времени запаздывания T_1 = 5 мс, при котором амплитуда пульсаций мала, соответствует значению частоты среза КРТ, необходимого для устранения негативного влияния пульсаций электромагнитного момента. Это значение составляет порядка 200 рад/с. Данный аргумент говорит также в пользу функциональной схему с индивидуальными источниками тока, которая имеет максимальное быстродействие КРТ среди прочих вариантов силовых схем.

Относительно корректирующих связей можно заключить, что коррекция по двум фронтам (спадающему и нарастающему) позволяет получить среднее значение момента на 10 % большее, чем в системе без коррекции в случае высоких значений T_1. Следовательно, применение корректирующей обратной связи наиболее эффективно для систем управления, в которых нет возможности реализовать быстродействующий контур регулирования скорости. В этом случае мы можем добиться как наибольшей эффективности корректирующей обратной связи, так и ощутимо снизить амплитуду пульсаций электромагнитного момента. Стоит оговорить, что экспериментальное исследование включает в себя только статические режимы, в переходных процессах амплитуда пульсаций может возрастать [4, 5]. Поэтому, использование корректирующей связи является целесообразным и для систем с быстродействующим КРТ.

Библиографический список

1. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / Ю.С. Усынин. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.

2. Юферов, Ф.М. Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1998.

3. Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Pastorelli, A. Vagati // Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, Vol. 1, 2–6 Oct. – 2005. – Vol. 1. P. 474–479.

4. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9, № 11 (111). – С. 52–53.

5. Improved reliability and high power rating in AC drives by means of phase redundancy – some analytical and experimental results / G. K. Singh, M. Bhattacharyya, V. Pant // J. Inst. Eng. Elec. Eng. Div (India). – 2001, June. – Vol. 82.– P. 7–14.

УДК 62-83:621.313.3

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев

Дана количественная оценка возможности увеличения линейной нагрузки синхронной реактивной машины независимого возбуждения по сравнению с асинхронным двигателем тех же габаритов. Произведено математическое моделирование тепловых процессов в машине и определены пути их уменьшения.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина независимого возбуждения, метод конечных элементов, тепловая модель.

Ротор синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) выполняется без обмотки. Это обстоятельство позволяет, во-первых, за счет отсутствия противо-ЭДС не выполнять защиту преобразователя от перенапряжения, а во-вторых, при тех же габаритных размерах, что и АД той же мощности, получить больший электромагнитный момент за счет увеличения линейной нагрузки. Актуальным становится вопрос количественной оценки такого увеличения [1–3].

Основным источником выделения тепла в СРМНВ являются обмотки с током, однако, следует также учитывать добавочные потери на гистерезис и вихревые токи, обусловленные высшими гармониками МДС статора и зубцовыми пульсациями. Дополнительно нагрев происходит из-за механических потерь, например, трения в подшипниках двигателя.

Если активные потери в обмотке определяются однозначно, как $\Delta P_{эл} = mI_{ф}^2 R_{ф}$, где $R_{ф}$ – сопротивление обмотки фазы, $I_{ф}$ – действующее значение тока в фазе, то методика определения магнитных потерь существует множество. Так, в [4] потери на поверхности массивного полюса рассчитываются как

$$p`_0 = \frac{(B_{mr} k_{rv} \tau_v)^2 \cdot f_v^{1.5}}{\sqrt{\pi \mu \rho}}, \quad (1)$$

где B_{mr} – амплитуда нормальной составляющей индукции поля; k_{rv} – коэффициент, учитывающий размагничивающее действие вихревых токов; τ_v, f_v – полюсное деление и частота v гармоники; μ, ρ – магнитная проницаемость и удельное сопротивление материала.

Данный метод позволяет достаточно просто оценить долю потерь, обусловленных высшими гармониками МДС статора [5–6]. Однако здесь делается одно серьезное допущение – применять (1) справедливо только в случае равномерного распределения индукции в зазоре над всей поверхностью полюса. В СРМНВ, картина магнитного поля имеет вид, показанный

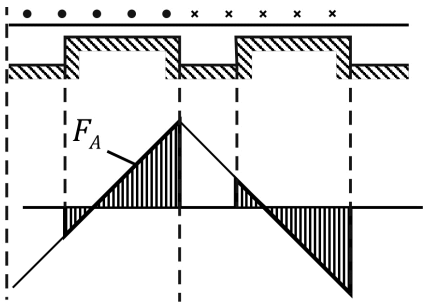


Рис. 1. Индукция в зазоре СРМНВ

на рис. 1, что вызывает перераспределение добавочных потерь по ширине полюса и может привести к значительным нагревам той части ротора, где имеет место усиление магнитного потока.

Количественную оценку магнитных потерь с учетом вышеуказанной несимметрии индукции в зазоре можно получить в системе конечно-элементного анализа *Ansys* [7, 8]. Преимуществом такого подхода является получение картины распределения тепла в машине, что позволяет выявить местный перегрев отдельных частей двигателя.

На первом этапе необходимо было верифицировать конечно-элементную модель. Для этого проводился слдующий эксперимент. Ротор машины затормаживался, а по обмоткам пропускался гладкий постоянный ток, другими словами, оценивались только активные потери. После расчета в конечно-элементной системе *ANSYS Maxwell* эти потери экспортировались в тепловую конечно-элементную модель *ANSYS Transient-thermal*. В принятой математической модели учитывался лучистый и конвективный теплообмен между обмоткой и магнитопроводом.

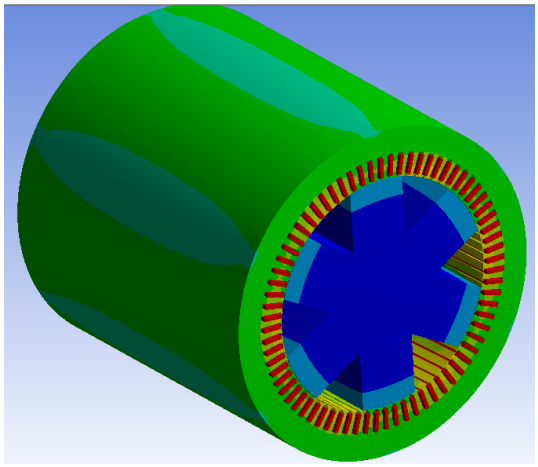


Рис. 2. Трехмерная тепловая модель магнитопровода СРМНВ

На рис. 2 приведена трехмерная тепловая модель СРМНВ с учетом только активных потерь в меди.

Как и ожидалось, наиболее горячей получается обмотка, которая выделяет тепло, по большей части в статор. Ротор же при этом нагревается гораздо меньше.

Для корректности расчета результаты моделирования проверялись на лабораторном образце СРДНВ, выполненного на базе асинхронного двигателя 4А100L4. На рис. 3 приведены результаты натурного эксперимента.

При работе СРМНВ от преобразователя важно также учесть потери на перемагничивание, вихревые токи и потери, вызванные коммутацией. Для этого была разработана система управления СРМНВ, где сама машина рассчитывалась методом конечных элементов. Подробно структура модели описана в [9–12].

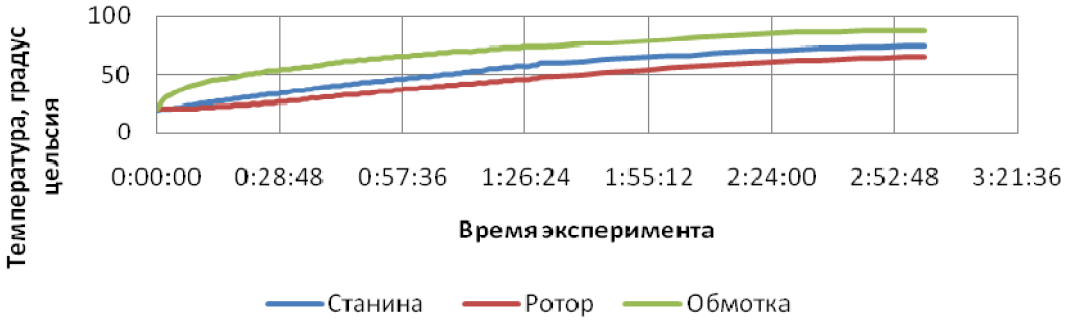


Рис. 3. Результаты натурного эксперимента

В *ANSYS Maxwell* это учитывается следующим образом:

$$p = k_h B_{\max f}^2 + k_c (B_{\max f})^2, \quad (2)$$

где k_h – коэффициент потерь на гистерезис; k_c – эмпирический коэффициент потерь на вихревые токи, $B_{\max}$ – амплитуда индукции, f – частота первой гармоники.

Графически распределение потерь по поверхности машины приведено на рис. 4. Как видно из рисунка, наибольшие потери выделяются в «набегающем» крае полюса за счет коммутации токов. Потери в зубцовой зоне обусловлены перемагничиванием.

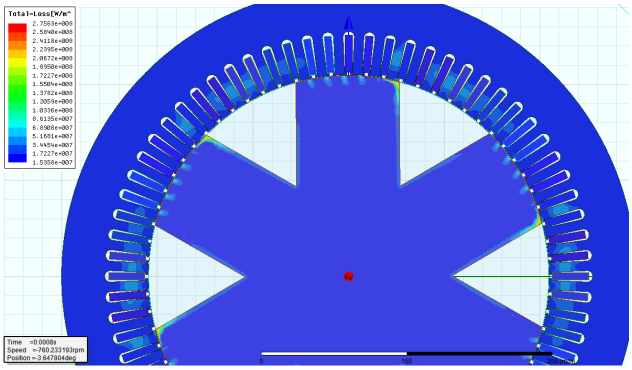


Рис. 4. Распределение магнитных потерь в разрезе машины

На последнем этапе производилась оптимизация формы и габаритных размеров рифлений ротора в трехмерной модели [13], что позволило снизить нагрев машины на 5 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что в СРДНВ за счет «холодного» шихтованного ротора и оптимизированной формы рифлений можно увеличивать линейную нагрузку в среднем на 15 % по сравнению с АД тех же габаритных размеров, что не приведет к перегреву машины.

Библиографический список

1. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – № 3. – 2007. – С. 21–26.

2. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34 (167). – С. 51–55.

3. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – № 16 (275). – С. 107–110.

4. Монюшко, Н.Д. Добавочные потери на поверхности массивных полюсных наконечников явнополюсных синхронных машин: автореф. дис. … канд. техн. наук / Н.Д. Монюшко // Ленинград. политехн. ин-т им. М.И. Калинина: – 1967. – 17 с.

5. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – № 37 (232). – С. 30–33.

6. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. –№ 32 (208). – С. 46–51.

7. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4 (4) – С. 70–76.

8. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11 (111). – С. 52–53.

9. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16. – № 34 (251). – С. 21–27.

10. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

11. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14 (190). – С. 47–51.

12. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – № 15 (232). – С. 40–45.

13. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК H 02 K 19/24. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685; заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

УДК 621.313.322

ОБЪЕДИНЕННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПОТОКА МОЩНОСТИ КАК ЭЛЕМЕНТ СВЯЗИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн

Рассмотрено применение объединенного регулятора потоков мощности (ОРПМ), в качестве элемента связи синхронного генератора с системой бесконечной мощности. Для нормальных режимов, показана возможность работы генератора с нерегулируемым током обмотки возбуждения и с коэффициентом мощности равным единице. Выполнен анализ зависимости параметров ОРПМ от диапазона изменения нагрузки генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, объединенный регулятор потоков мощности, коэффициент мощности.

Регулирование напряжения и реактивной мощности синхронного генератора проводится изменением величины тока возбуждения. Система возбуждения получается сложной, существенно снижает надежность генератора и усложняет его эксплуатацию [1]. Рассмотрим возможность переложить функции регулирования напряжения и создания и потребления реактивной мощности на ОРПМ (рис. 2, а), который успешно реализует подобные функции на подстанциях энергосистем [2–6]. При этом возможно и увеличение активной мощности генератора, так как сечение обмотки статора рассчитано на полный ток, и разгрузка генератора по реактивной мощности позволяет увеличить его активную мощность [5].

Рассмотрим работу генератора с нерегулируемым током возбуждения и $\cos\varphi = 1$ на сеть бесконечной мощности. Вектор тока статора I_1 совпадает по направлению с вектором напряжения на шинах системы бесконечной мощности U, а вектор ЭДС E_1 опережает эти векторы на угол δ_1 (рис. 1). При изменении нагрузки, например при ее возрастании со значения P_1 до P_2, необходимо увеличить момент, приложенный к валу генератора, и угол δ_1 увеличится до значения δ_2. Мощность, отдаваемая генератором в сеть [2]:

$$P = \frac{EU\sin\delta}{X}, \qquad (1)$$

здесь X – индуктивное сопротивление обмотки статора генератора. Для соотношения мощностей P_1 и P_2 имеем:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sin\delta_1}{\sin\delta_2}, \qquad (2)$$

Конец вектора ЭДС скользит по окружности радиусом, равным E_1, так как ток возбуждения остается неизменным (рис. 1).

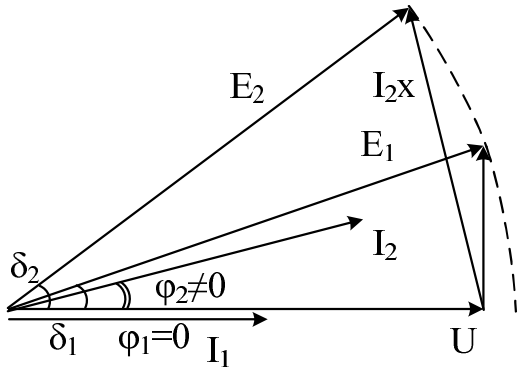


Рис. 1. Векторные диаграммы для генератора с нерегулируемым током возбуждения и cosφ = 1 при увеличении активной нагрузки

Диаграммы (см. рис. 1) показывают, что при увеличении активной нагрузки генератора растет и потребление из сети реактивной мощности, и он переходит в режим недовозбуждения. Такой режим вызывает дополнительный нагрев крайних пакетов активной стали и конструктивных элементов торцевых зон статора. Дополнительный нагрев обусловлен повышенной результирующей индукцией в торцевых зонах, что объясняется слабой магнитной связью обмоток статора и ротора в этих зонах и недостаточной компенсацией потока рассеяния статора потоком ротора. Применение ОРПМ совместно с синхронным генератором позволит избежать таких режимов. ОРПМ к вектору ЭДС генератора дополнительно вводит вектор ΔU, за счет которого можно сохранить работу генератора с cosφ = 1 (рис. 2, б). Вектор ΔU совпадает по фазе с вектором ЭДС, а его величина:

$$\Delta U = \frac{U}{\cos\delta_2} - E_1, \tag{3}$$

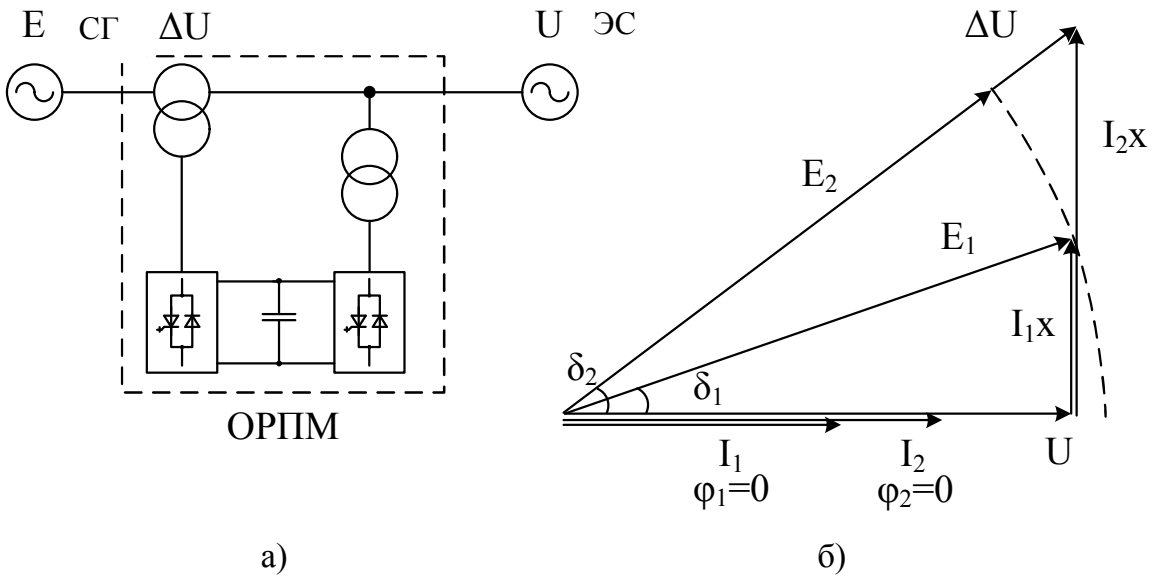
От диапазона значений ΔU зависят параметры основного оборудования ОРПМ (преобразователей, трансформаторов) [6]. Значение ΔU определяется глубиной изменения мощности генератора и от исходного значения угла δ_0. На рис. 3 приведены зависимости значений ΔU (в о.е. по отношению к ЭДС генератора) от активной нагрузки, для двух значений начального угла 45° и 30°. Здесь отрицательные значения ΔU соответствуют случаю противоположно направленных векторов ΔU и E, а положительные – сонаправленных. Полученные зависимости показывают, что значение угла δ_0 существенно влияет на величину ΔU.

Ток сетевой обмотки последовательного трансформатора (рис. 2, а), при пренебрежении ее активным сопротивлением и его полная мощность:

$$I = \frac{E + \Delta U - U}{X}, \qquad S = \frac{E + \Delta U - U}{X}\Delta U. \tag{4}$$

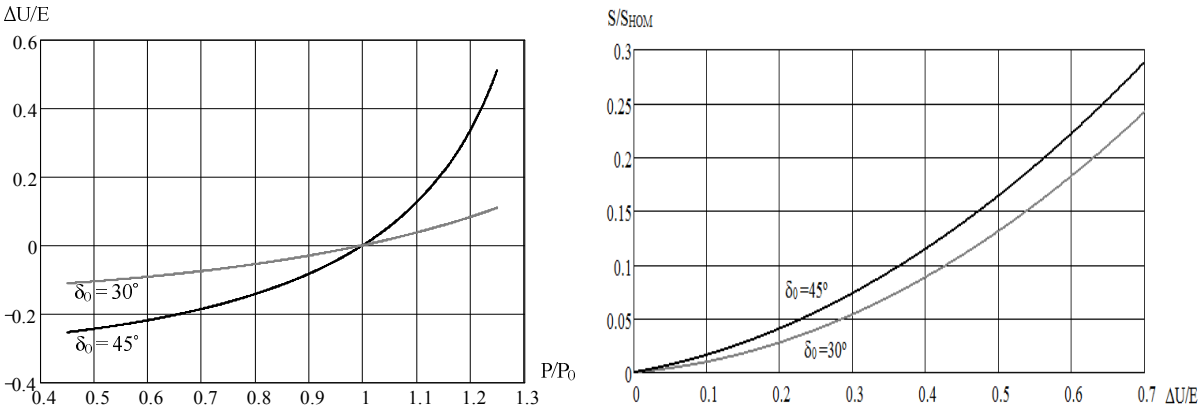
Для cosφ = 1, U = Ecosδ_0 и полная мощность трансформатора:

$$S = \frac{E(1 - \cos\delta_0) + \Delta U}{X}\Delta U. \tag{5}$$



а) б)

Рис. 2. Схема включения ОРПМ (а) и векторная диаграмма работы генератора и ОРПМ при увеличении активной нагрузки (б).



а) б)

Рис. 3. Графики зависимости значений ΔU от значений активной нагрузки (а) и зависимости мощности последовательного трансформатора ОРПМ от ΔU (б) для значений углов δ_0 45° и 30°

На рис. 3, б для генератора ТГВ-500 приведены зависимости мощности последовательного трансформатора ОРПМ (в о.е. по отношению к номинальной мощности генератора) от ΔU для значений угла δ_0 45° и 30°. Они позволяют определить мощность основного оборудования ОРПМ при нормируемых изменениях нагрузки. Например, при увеличении нагрузки на 20 % потребуется напряжение ΔU равное 0,35E (рис. 3, а), которому соответствует мощность 0,09 о.е. Для генератора ТГВ-500 мощность трансформатора составит 52,9 МВА.

Применение ОРПМ, как элемента связи синхронного генератора с энергосистемой, делает возможным его работу с нерегулируемым током воз-

буждения, а также с cosφ = 1. Параметры основного оборудования ОРПМ для такой схемы определяются в зависимости от необходимой глубины регулирования. Работоспособность системы в аварийных и послеаварийных режимах является объектом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Гольдштейн, М.Е. Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов: учеб. пособие / М.Е. Гольдштейн. – 3-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 103 с.

2. Рыжов, Ю.Л. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов / Ю.П. Рыжов. – М: Издат. дом МЭИ, 2007. – 488 с.

3. Гаврилов, А.И. О регулировании режимных параметров подстанций с объединенным регулятором потока мощности / А.И. Гаврилов, И.С. Егоров // Научные труды 3-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Екатеринбург, 2012. – Т. 1. – С. 481–483.

4. Егоров, И.С. Средства регулирования режимов электрических сетей на базе силовой электроники // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 135–137.

5. Егоров, И.С. Применение элементов гибкого регулирования режимов в схемах выдачи мощности электростанций // Труды XIII Международной молодежной научной конференции «Интеллект и наука», г. Железногорск, 16–18 апр. 2013 г. – Железногорск, 2013. – С. 156–158.

6. Hingorani, Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

УДК 621.314.5

МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков

Рассмотрены особенности ввода математической модели длительных режимов передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в программу расчета электрической сети NetWORKS. Описаны основные режимные ограничения передачи и их влияние на диапазон регулирования реактивной мощности преобразовательными подстанциями.

Ключевые слова: передачи постоянного тока, преобразователь напряжения, математическая модель.

Передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователя напряжения (ППТ-ПН) в последние годы привлекают все больше внимания. Для реализации функциональных возможностей их работы в энергосистеме приходиться проводить ряд исследований режимов. При этом целесообразно применять типовые программы расчета режимов. Анализ асинхронной связи узлов энергосистемы, связанных ППТ-ПН [1], позволяет рассмотреть особенности адаптации модели ППТ-ПН, предложенной в работе [2], в такие программы на примере программы NetWORKS.

За базу тестовой электрической сети примем 14-узловую сеть (рис. 1) [3], рекомендуемую для исследований IEEE. Приводя тестовую сеть к условиям нашей страны, примем номинальные напряжения 1-5 узлов, равными 220 кВ, 6-14 узлов – 110 кВ. Трансформаторы, связывающие узлы 4-9 и 5-6, заменим автотрансформаторами с соответствующими сопротивлениями (узлы низкого напряжения 7, 8 в дальнейшем не рассматриваем). Генерирующие мощности и нагрузки для одноименных узлов приведем к расчетным. В качестве балансирующего примем первый узел. Величины генерирующих мощностей, нагрузок и источников реактивной мощности в сети возьмем такими же, как в работе [3]. Особенность сети состоит в том, что возможен режим, в котором нагрузка в узле 3 при питании от генераторов узла 1 приводит к перегрузке линии 1-2, тогда как линии 5-4 и 4-3 недогружены. Расчеты различных режимов показали, что при помощи косого показали, что при помощи косого регулирования на автотрансформаторах можно разгрузить линию 1-2, обеспечив транзит мощности от узла 5 через сеть 110 кВ в узел 4, однако, при этом окажутся перегруженными линии 6-11, 11-10 и 10-9, поэтому такое решение неприемлемо.

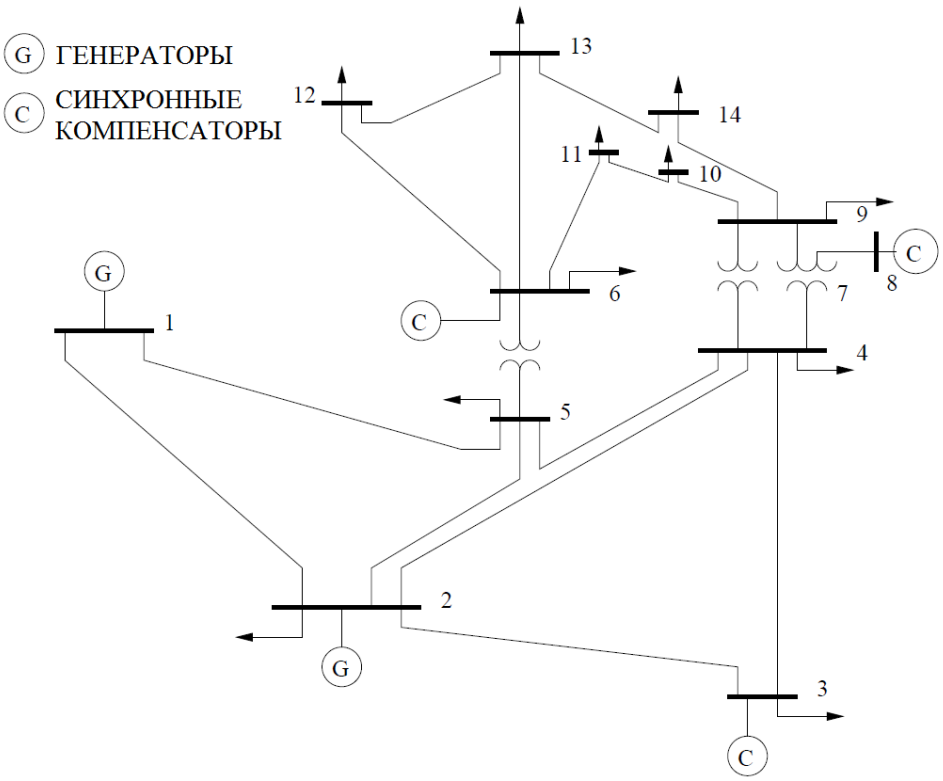


Рис. 1. Схема тестовой сети

Для того чтобы оценить возможность адаптации математической модели ППТ-ПН [2] в программу расчета режимов электрической сети, рассмотрим вариант связи узлов 1 и 3 передачей постоянного тока мощностью 200 МВт (рис. 2). Модель состоит из двух шунтов тока с регулируемыми источниками ЭДС, причем активные токи шунтов отличаются на величину потерь в передаче.

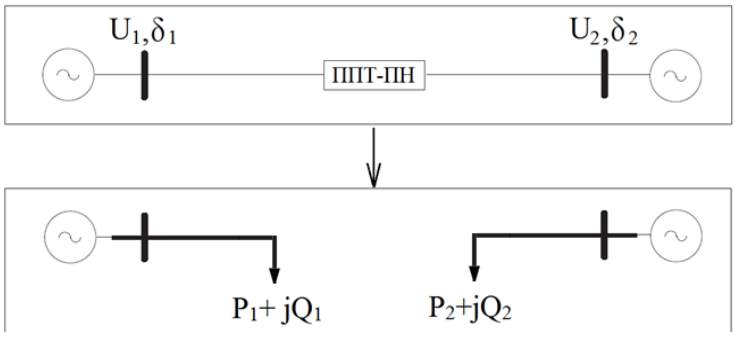


Рис. 2. Моделирование ППТ-ПН

С точки зрения схемы замещения энергосистемы такая модель – это два несвязанных узла с фиксированными величинами активных и реактивных мощностей, где потребление мощности первого связано с выдачей мощности второго узла. Это справедливо, так как величина полного тока шунта, то есть полная мощность, зависит только от амплитуды и фазового сдвига

напряжения источника ЭДС по отношению к напряжению системы. Поэтому, в дальнейшем при моделировании ПН вместо пары (U, δ) будем использовать (P, Q). Область возможных режимов ППТ-ПН в P-Q координатах ограничена по диапазону регулирования величины реактивной мощности преобразователей, так как ее изменение вызывается изменением тока вентилей ПН и напряжения, генерируемого ПН.

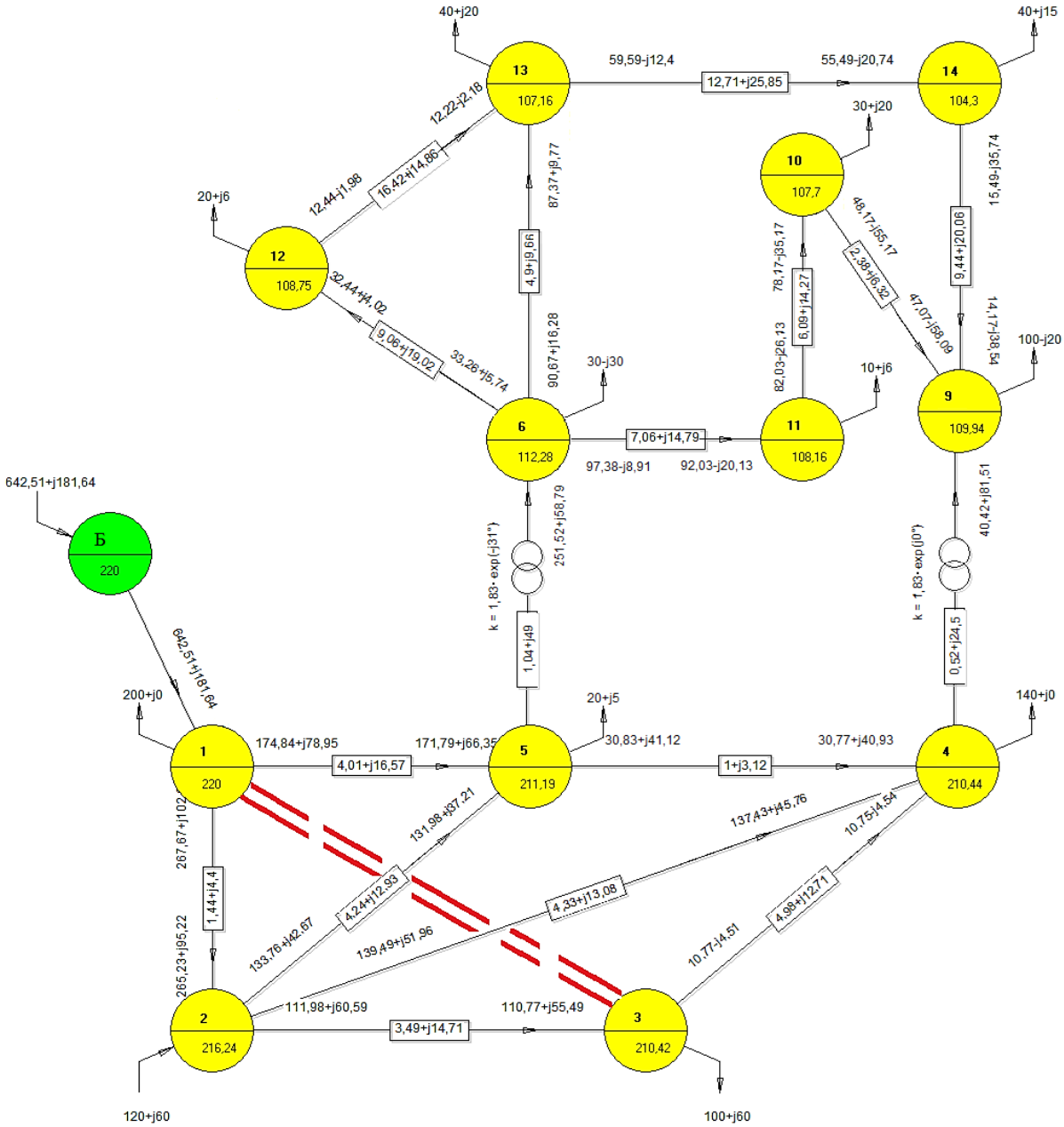


Рис. 3. Карта режима тестовой сети с передачей постоянного тока

Ток, протекающий в вентилях, зависит как от активной, так и от реактивной составляющей полного тока, поэтому на PQ-области режимов работы ППТ это ограничение соответствует окружности с центром в начале координат. В отличие от режима СТАТКОМ, при передаче активной мощ-

ности реактивный ток должен быть снижен по мере роста активной составляющей тока. Поэтому, обычно в типовых проектах ППТ-ПН реактивный ток ограничен величиной 0,5 от активного для любых режимов [4].

Второе ограничение связано с увеличением переменного напряжения ПН при росте генерации реактивной мощности со стороны ПН, поэтому в режимах с повышенными напряжениями в сети выдать необходимую величину реактивной мощности может и не удастся.

Карта режима сети с адаптированной моделью ППТ-ПН (рис. 3) позволяет провести анализ расчетного режима, в частности, определить, что потери в сети переменного тока снизились на 10,6 МВт. Так как величина суммарных потерь в типовой ППТ-ПН как правило не превышает 5 % от номинальной мощности [4] (10 МВт), то суммарные потери в сети с ППТ-ПН оказались ниже, чем без нее. В режимах с выдачей во второй узел 200 МВАр его напряжение повысилось на 10 кВ, что не является ограничивающим фактором, поэтому, в первую очередь, как правило, учитывают ограничение по полному току.

Таким образом, введение модели ППТ-ПН в программу расчета сети NetWORKS и учет режимных ограничений при регулировании реактивной мощности на любом из преобразователей передачи позволили проанализировать длительные режимы работы энергосистемы, содержащий передачу постоянного тока.

Библиографический список

1. Гольдштейн, М. Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асинхронными связями / М.Е. Гольдштейн, К.Ю. Филяев // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 12–18.

2. Гольдштейн, М.Е. Математическая модель длительных режимов передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения / М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37. – С. 126–128.

3. Kodsi, S. K. Mena. Modeling and Simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers / S.K. Mena Kodsi, C.A. Canizares // IEEE Technical Report. – 2003. – № 3. – 54p.

4. Technical description of HVDC Light® technology / http://dok.ebl-kompetanse.no/Foredrag/2008/Reg%20og%20sentralnett/Stendius.pdf

УДК 621.313.322

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ЦЕПЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ТИРИСТОРНЫМ УСТРОЙСТВОМ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ

А.В. Прокудин

По результатам исследований математической модели тиристорного устройства гашения поля синхронного генератора получены зависимости полного времени гашения поля от числа ступеней и величины пульсаций напряжения при различных вариантах построения схемы.

Ключевые слова: система самовозбуждения, гашение поля, синхронный генератор, тиристорный преобразователь, автомат гашения поля.

Процесс гашения магнитного поля синхронного генератора обеспечивается выводом энергии, накопленной в магнитной системе. Основная часть энергии накапливается в обмотке возбуждения. При возникновении повреждений в цепях статора генератора требуется погасить поле машины за минимальное время, тем самым, снизив ущерб от аварии. Задача минимизации времени гашения поля сводится к поддержанию максимально возможной отводимой мощности из обмотки возбуждения. Значение максимальной мощности в данном случае ограничивается допустимой величиной перенапряжений на выводах обмотки возбуждения U_{fmax}. Самый быстрый процесс гашения поля из режима двукратной форсировки по току описывается следующими выражениями [1]:

$$\left|U_{f\max}\right| = 10U_{f\text{H}};$$

$$u_f(t) = -10U_{f\text{H}};$$

$$i_f(t) = -\frac{U_{f\max}}{U_{f\text{H}}}I_{f\text{H}} + \left(\frac{U_{f\max}}{U_{f\text{H}}} + 2\right)I_{f\text{H}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_f}} = \tag{1}$$

$$= I_{f\text{H}}\left[\left(e^{-\frac{t}{\tau_f}} - 1\right)\frac{U_{f\max}}{U_{f\text{H}}} + 2e^{-\frac{t}{\tau_f}}\right];$$

$$i_f(t) \geq I_{f\text{K}}.$$

Здесь $U_{f\text{H}}$ – номинальное напряжение возбуждения, $I_{f\text{H}}$ – номинальный ток возбуждения, $\tau_f = L_f/R_f$ – постоянная времени обмотки возбуждения, $I_{f\text{K}}$ – ток возбуждения, соответствующий окончанию процесса гашения поля. Окончание процесса гашения поля обычно соответствует снижению на-

пряжения на выводах статора генератора до величины, при которой не поддерживается горение дуги. Обычно дуга гаснет при напряжении ниже 500 В [2], что для большинства машин соответствует току возбуждения $0{,}009I_{f\text{Н}}$.

Процесс гашения поля (1) достигается только в том случае, если напряжение гашения поля не зависит от тока и максимально допустимое. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) устройства гашения поля (УГП) $U(I) = \text{const} = U_{f\max}$. Это можно достичь применением автоматов гашения поля (АГП) и нелинейных резисторов [3]. Минимально достижимое время гашения магнитного поля для ненасыщенной электрической машины в случае идеального УГП составляет $0{,}18\tau_f$. К сожалению, применение АГП и энергоемких нелинейных резисторов ограничивается их высокой стоимостью.

ВАХ УГП, приближающаяся к идеальной, можно получить путем ступенчатого изменения сопротивления линейного резистора. Причем, чем больше число переключаемых ступеней сопротивления резистора, тем ВАХ ближе к идеальной. Этот принцип реализован в тиристорном устройстве гашения поля (ТУГП) путем последовательного или параллельного соединения резисторов ступеней (рис. 1).

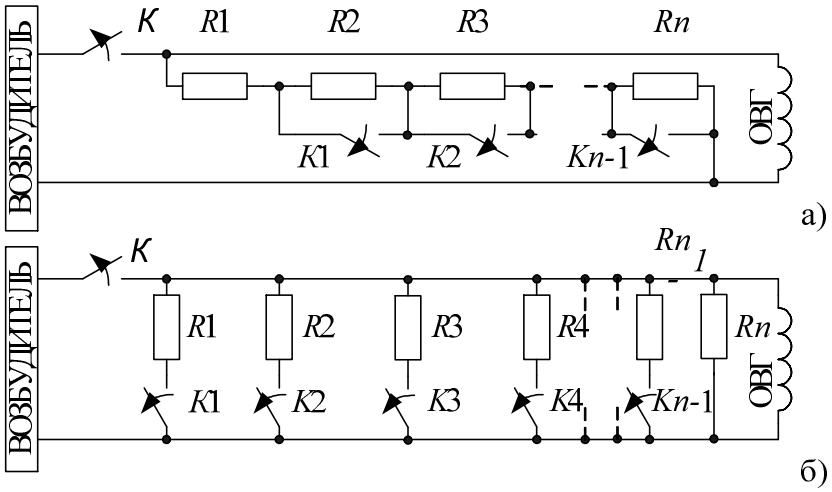


Рис. 1. Варианты схем построения ТУГП

Оба варианта ТУГП обладают идентичными характеристиками процесса гашения поля, которые определяются числом и величинами сопротивлений резисторов ступеней. С точки зрения производства, удобно применять резисторы с одинаковым сопротивлением. Но это не всегда обеспечивает минимальное время гашения поля (рис. 2). Это связано с тем, что, применяя резисторы с одинаковым сопротивлением, однозначно можно добиться лишь выполнения условия непревышения допустимого уровня перенапряжений при отрабатывании N ступеней (рис. 3, а). Хотя это несущественно при малом числе ступеней.

Попытка приблизить ступенчатую зависимость $u_f(t)$ к $u_f(t) = Uf_{\max}$ путем подбора сопротивлений ступеней приводит к снижению времени гашения поля при большом числе N, но негативно сказывается на процессе гашения при малом числе ступеней. Причиной этого является то, что оптимизировать процесс выведения энергии при ограниченном числе ступеней можно только на определенном интервале времени с начала процесса гашения. Оставшееся время процесс может протекать с неоптимальными условиями. Соотношение длительностей оптимального участка и неоптимального определяется величиной размаха пульсаций ΔU_f (рис. 3, б). И, как результат, при одном и том же числе ступеней N размах пульсаций определяет время гашения (рис. 4).

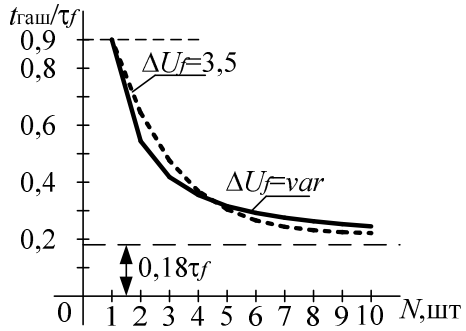


Рис. 2. Зависимость времени гашения поля от числа ступеней

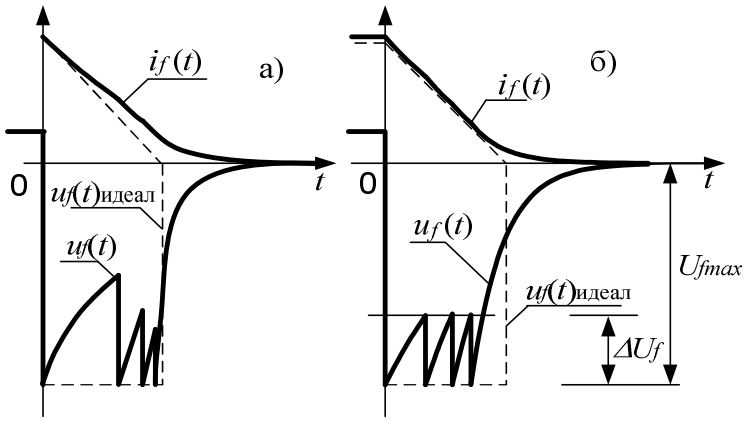


Рис. 3. Временные зависимости тока и напряжения обмотки возбуждения при реализации ТУГП на одинаковых резисторах (а) и при оптимизации процесса гашения

В случае применения резисторов с одинаковыми сопротивлениями переключения происходят в большей части длительности гашения поля и, при определенных условиях, поле гасится быстрее (см. рис. 2).

Вопрос выбора параметров ступеней ТУГП решается с учетом двух факторов: соотношение «затраты/время гашения» и устойчивость работы

ТУГП. Схема ТУГП на одинаковых резисторах позволяет применять простые, дешевые и надежные схемы на тиристорах с пороговыми устройствами [1].

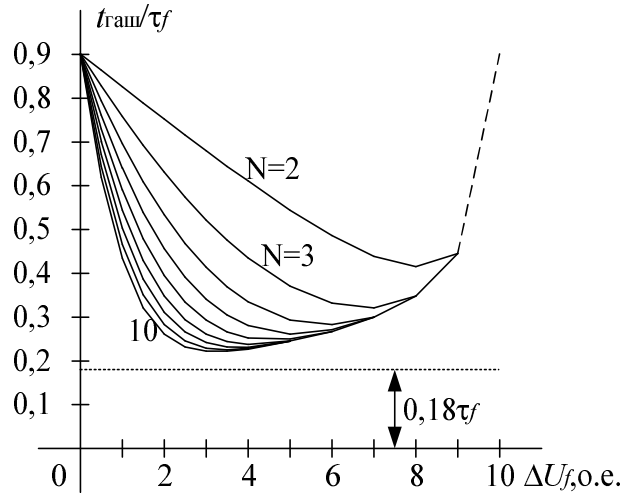


Рис. 4. Зависимость времени гашения от величины размаха пульсаций при разных количествах ступеней

Вариант с оптимальной схемой требует создания для тиристора каждой ступени отдельного канала системы управления с контролем величины тока возбуждения [4]. В любом случае, оснащение системы возбуждения устройством, выполненным описанным выше способом, позволяет существенно сократить время гашения поля. Особенно это важно для систем самовозбуждения генераторов малой и средней мощности, а также синхронных двигателей, где применение специализированных устройств гашения поля экономически не целесообразно.

Библиографический список

1. Прокудин, А.В. Сравнительные испытания тиристорного устройства гашения поля синхронного генератора / А.В. Прокудин // III международ. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодёжи»: сб. науч. тр. в 2 т. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 265–268.

2. ГОСТ 21558–2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия.

3. Брон, О.Б. Автоматы гашения магнитного поля. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 138 с.

4. Пат. 2282925 Российская Федерация, МПК H02 H 7/12 H02P 9/14. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / Е.Я Крекер, М.Е. Гольдштейн, А.Н. Андреев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет. – № 2005111665/09; заявл. 19.04.05; опубл. 27.08.06, Бюл. № 27 (II ч.). – 3 с.: ил.

УДК 621.316.9

ПРИМЕНЕНИЕ СВОБОДНО-ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕРМИНАЛОВ В ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

А.Н. Садовников

Рассмотрена возможность использования микропроцессорных свободно-программируемых терминалов для создания централизованного комплекса релейной защиты и автоматики в распределительной сети с установками малой генерации.

Ключевые слова: алгоритм встречно-направленной логической защиты шин низкого напряжения типовой двухтрансформаторной подстанции.

В настоящее время распределительные сети 0,4, 6, 10 кВ предприятий оснащаются генерирующими устройствами, например газотурбинными, газопоршневыми установками, постоянно работающими в режиме параллельной работы с питающей энергосистемой. При этом меняется режим работы подстанций предприятия, выполненных чаще всего по схемам 4Н, 5Н, 5АН по [1] на двухстороннее питание. Устройства релейной защита и автоматики (РЗА) распределительной сети предприятия перестают соответствовать нормативным требованиям. Необходима реконструкция системы РЗА подстанций предприятия.

В соответствие с [2, 3] основными требованиями к РЗА двухтрансформаторных подстанций, работающих в режиме двухстороннего питания являются: наличие быстродействующей защиты шин и обеспечение селективности выдержек времени максимальных токовых защит (МТЗ) при различном направлении мощности короткого замыкания (КЗ) через защиту.

Логическая защита шин 6–10 кВ, реализуемая в микропроцессорных терминалах представленных на рынке для данного напряжения сети, не пригодна в случае двухсторонней подпитки места КЗ. Применение специализированной дифференциальной защиты шин требует установки дополнительных терминалов на каждое присоединение, что ведет к росту затрат. Кроме того, на рынке устройств РЗА отсутствуют типовые, проработанные решения по установке дифференциальной защиты на шины низкого напряжения (6–10 кВ) понизительных двухтрансформаторных подстанций.

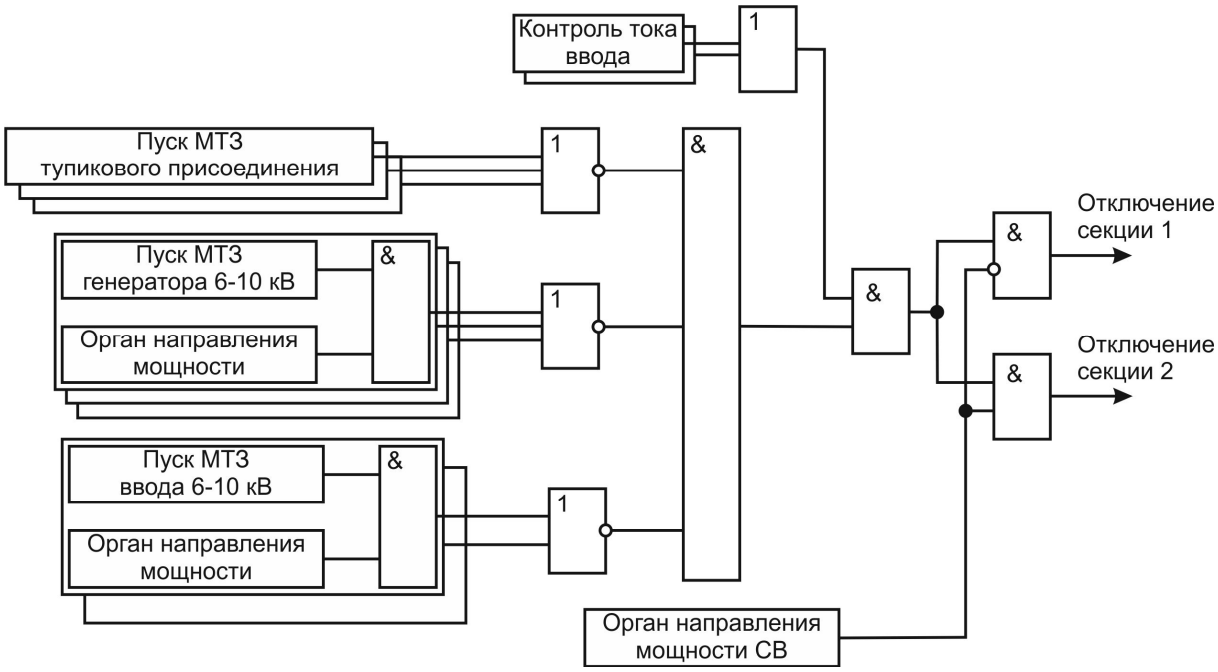
Создать логическую защиту шин в сети с двусторонним питанием можно применив централизованный комплекс РЗА, связав свободно программируемый контроллер, которые широко представлены на рынке, с входными/выходными сигналами отдельных устройств РЗА присоединений подстанции, как описано в работах [4, 5].

С конца 2012 года на рынке устройств РЗА появились терминалы с наличием не только свободно-программируемой логикой, позволяющей менять назначение дискретных входов/выходов и реализовывать простейшие логические функции и выдержки времени, но и с использованием гибких функций защиты, позволяющих изменять алгоритмы функционирования отдельных видов (ступеней) защит (автоматики). Одной из первых подобные устройства стала выпускать фирма Siemens в сериях SIPROTEC Compact и SIPROTEC 5.

При выполнении РЗА подстанции на терминалах с подобной функциональностью, возможно, создать логическую защиту шин в сети с двусторонним питанием т.н. встречно-направленную логическую защиту, разработав алгоритмы отдельных терминалов и методику выбора их уставок. При поддержке терминалами протокола МЭК 61850 возможна передача между терминалами дискретных сигналов не сухими контактами на оперативном напряжении, а цифровым способом через электрический RS485 или оптический интерфейс, что позволяет уменьшить количество дополнительных модулей дискретных входов/выходов в терминалах и повысить быстродействие алгоритма определение повреждения на шинах.

Для разработки алгоритмов отдельных терминалов реализующих встречно-направленную логическую защиту шин и методики выбора параметров (уставок) использовалась модель релейной защиты и автоматики двухтрансформаторной подстанции [6, 7], реализованная с помощью пакета LabView. Так на рисунке показан упрощенный алгоритм определения места КЗ на 1 или 2 секции 6–10 кВ, при подключении генераторов к шинам. Для обеспечения параллельной работы генераторов секционный выключатель (СВ) шин включен, связь с системой осуществляется через один из вводных выключателей первой или второй секции (другой отключен, для недопущения параллельной работы трансформаторов, питающих секции). Защита шин блокируется при внешнем КЗ. При КЗ на тупиковых присоединениях блокирующий сигнал поступает от факта пуска МТЗ поврежденного присоединения, при КЗ на присоединении с генератором – пуск МТЗ данного присоединения с учетом срабатывания органа направления мощности, при КЗ до шин – пуск МТЗ рабочего ввода с учетом срабатывания органа направления мощности.

Кроме встречно-направленной логической защиты шин, терминалы со свободно-программируемой логикой и с использованием гибких функций защиты позволяют реализовать и прочие функции, присущие централизованным комплексам РЗА: резервирование отказов выключателей присоединений с учетом двустороннего питания; включение резерва с учетом синхронизации с генераторами, включенными на шины НН подстанции; ускорение МТЗ тупиковых присоединений.



Упрощенный алгоритм определения места КЗ на 1 или 2 секции 6–10 кВ встречно-направленной логической защиты шин

Заключение

1. При подключении генераторов к шинам 6–10 кВ низкого напряжения типовых комплектных двухтрансформаторных подстанций в соответствии с нормативными требованиями требуется реализация быстродействующей защиты шин.

2. При реализации защит на подстанции терминалами со свободно-программируемой логикой с использованием гибких функций защиты в конфигурации, поддерживающей протокол МЭК 61850, возможно построение быстродействующей логической защиты шин низкого напряжения с учетом двустороннего питания.

3. Разработаны алгоритмы для терминалов РЗА подстанции, реализующие встречно-направленную логическую защиту шин.

4. Проведенный анализ работы встречно-направленной защиты шин на компьютерной модели РЗА двухтрансформаторной подстанции показал, что предложенные алгоритмы встречно-направленной логической защиты шин эффективны для всех режимов работы рассматриваемых подстанций.

5. Разработаны методы расчета уставок встречно-направленной логической защиты шин на отдельных терминалах РЗА. Исследовано их влияние на параметры селективности, быстродействия и чувствительности защиты.

6. Проработаны варианты аппаратной реализации встречно-направленной логической защиты шин.

Библиографический список

1. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения. – М.: Энергосетьпроект, 2011. – 144 с.

2. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2011. – 928 с.

3. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации. – М.: ФСК ЕЭС, 2012. – 110 с.

4. Садовников, А.Н. Централизованные комплексы релейной защиты и автоматики типовых комплектных двухтрансформаторных подстанций 35–220 кВ / А.Н. Садовников // Наука ЮУрГУ: материалы 63-й науч. конф. Секции технических наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – 331 с.

5. Садовников, А.Н. Использование централизованных комплексов релейной защиты и автоматики при подключении генерирующих мощностей к шинам низкого напряжения понизительных двухтрансформаторных подстанций / А.Н. Садовников // Федоровские чтения: материалы XLI Всесоюз. науч.-практ. конф. (с междунар. участием). – М.: Издат. дом МЭИ, 2011. – 210 с.

6. Садовников. А.Н. Компьютерная модель релейной защиты и автоматики комплектной трансформаторной подстанции / А.Н. Садовников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2002. – Вып. 2 – № 7 (16).

7. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9693. Модель релейной защиты и автоматики двухтрансформаторной подстанции / А.Н. Садовников // Телеграф отраслевого фонда алгоритмов и программ. Инновации в науке и образовании. – № 12 (35).

УДК 621.316.1.017

МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И АЛГОРИТМ ЕЕ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.С. Павлюков, С.В. Павлюков, С.П. Сусанин

Приводятся результаты разработки и исследования модели элемента искусственного интеллекта с целью прогнозирования функций времени, влияющими на перспективный режим функционирования технических систем.

Ключевые слова: элемент искусственного элемента, нейронная сеть, алгоритм обучения, функции времени.

Разработка систем управления для различных технических объектов в современных условиях является важной научной задачей, которая требует развития и применения новых методологий. Первостепенное значение при разработке новых технологий будет иметь повышение требований к точности моделирования текущих и перспективных процессов управления техническими коммуникациями и объектами электроэнергетики. К таким новым технологиям можно отнести использование элементов искусственного интеллекта. Указанное выше является актуальным и определяет направление исследований в области управления техническими системами.

В работе предлагается развитие математического моделирования функций времени или графиков мощностей нагрузок, позволяющее решать задачу оперативных расчетов режимов в разрезе суток, а также краткосрочного планирования режимов, повышая качество управления работой электротехнических систем. Перспективным направлением исследований для указанной задачи является применение аппарата элементов искусственного интеллекта.

Наиболее объемная режимная узловая информацию высоковольтной или питающей системы моделируются в виде детерминированных данных, вектора-функций графиков полных мощностей за некоторый дискретный интервал времени [1]

$$\mathbf{s}(t) = \left[s_i(t) \right] = \left[p_i(t) + jq_i(t) \right], \quad (1)$$

или с использованием режимной информации в виде узловых токов

$$\mathbf{j}(t) = j_i'(t) + j_i''(t). \quad (2)$$

Зависимости компонент узловых нагрузок рассматриваются в виде произведений $p_i(t) = p_i f_i^{p}(t)$, $q_i(t) = q_i f_i^{q}(t)$, $j_i'(t) = j_i' f_i^{j'}(t)$, $j_i''(t) = j_i'' f_i^{j''}(t)$ средних значений активных p_i, реактивных q_i мощностей, действительной j_i' и мнимой j_i'' составляющих узловых токов и соответствующих

функций $f_i^p(t)$, $f_i^q(t)$, $f_i^{j'}(t)$, $f_i^{j''}(t)$, ($i=\overline{1,n}$, n – число независимых узлов электрической системы) математические ожидания, каждой из которых за период времени T равны единице. Процесс развития рыночных отношений в электроэнергетике ставит задачи, связанные с производством, транспортом, распределением электроэнергии, и требует более точных решений их для текущих и упреждающих моментов времени T. Указанные задачи базируются на громоздких математических моделях, таких как, ряды Эйлера-Фурье, Вольтера, факторного моделирования, вероятностных моделях стационарного Марковского процесса и др.

Технические системы, в том числе электроэнергетическая, работают по определенному ритму, в котором внешнее и внутреннее ее состояние во многом повторяется через определенные промежутки времени. Используя наблюдение работы системы в момент времени t, можно предсказать ее работу в момент времени $t + d$, то есть ожидаемое в перспективе состояние. Подобные задачи можно решать с использованием элементов искусственного интеллекта, таких как Multiple layer perceptron–MLP [2] или многослойных нейронных сетей. Разработка нейронной сети зависит от типа задачи и ее сложности. Под конкретную задачу разрабатывают необходимую архитектуру нейронной сети со всеми ее атрибутами. Нейронная сеть представляет собой математическую модель особой конструкции, под которой понимается ее определенная многослойная архитектура и способы ее обучения для решения задач. Прежде чем использовать сеть для получения результатов, допустим прогнозирования функций времени, необходимо ее обучить. Для этого подготавливают определенные данные, с помощью которых необходимо обучить нейронную сеть, разделяя их на две группы: обучающую и тестирующую. Для целей прогнозирования берутся выборки данных ретроспективного характера. Входы сети синапсами соединяются с первым скрытым слоем, первый скрытый слой своими аксонами соединяется с синапсами следующего скрытого слоя, и т. д., последний скрытый слой с выходом сети. Все связи инициализируются весовыми коэффициентами случайным образом в интервале $\pm 1,0$ или используют генератор случайных чисел, распределенных в некоторой окрестности чисел, например, $[\pm 1,0]$ или $[+1,-1]$. Процесс обучения представляет итерационный характер. Каждая итерация называется эпохой, состоящей из двух этапов. Первый этап предназначен для развития вычислительного процесса от входа к выходу сети(в прямом направлении) с выполнением соответствующих операций. На выходе сети проверяется правильность работы сети. Если ошибка будет больше заданной при обучении сети на обучающей выборки данных, то применяется алгоритм обратного распространения для минимизации ошибки совместно с коэффициентом обучения сети. Проход осуществляется в противоположную сторону до первого скрытого слоя с выполнением корректирующих действий. Так как нейронная

сеть обрабатывает только числовые данные, то исходные данные предварительно подвергаются препроцессированию, для того, чтобы каждый элемент входного вектора принадлежал отрезку [0;1] или [–1;1] в зависимости от используемой функции активации. Нейроны скрытого слоя, связанного с входом, получают комбинированные сигналы, которые моделируются следующим уравнением, записанным в общем виде

$$ner_j^k = \sum_{j=1}^{n} w_{ji}^k pow_i, \qquad (3)$$

где w_{ji}^k – весовые коэффициенты связей нейронов с ячейками входных сигналов сети; $k = \overline{1,sl}$, sl – количество скрыты слоев сети; $j = \overline{1,m}$, m – число нейронов в скрытом слое; $pow(i)$ – сигналы входа, $i = \overline{1,n}$ – количество ячеек ввода сети. К этим сигналам добавляются сигналы $ec^k(cm)$ источников смещения: $nc^k(cm) = wc^k(cm) \cdot ec^k(cm), cm = \overline{1,kc}$, kc – количество связей с k слоем сети. Комбинированный сигналы слоя активируются с помощью специальных функций, например, $f(x) = 1/\left(1 + e^{(-x)}\right)$. После прямого прохода сигналов по сети проверяется ее реакция на ошибку. Ошибка работы сети проверяется согласно методу наименьших квадратов по выражению $err = 0,5\left(o_{ut} - out_1\right)^2$. Правильная реакция сети задается параметром o_{ut}. Реальное состояние выхода сети– out_1. Если результат не удовлетворяет поставленной задаче, то для уточнения или дальнейшего обучения нейронной сети применяют специальные приемы, например, алгоритм Backpropagation algorithm – обратного распространения ошибки. Функции данного алгоритма будут представлять обратный ход текущей эпохи [2].

Для разработанной нейронной сети(подробности не приводятся) был запущен пример для прогнозирования среднего некоторой функции времени за период *T*. Реальное значение выходного сигнала рассчитанного сетью – $out_1 = 0,725$. Правильная реакция нейронной сети на входной сигнал задана o_{ut}=1. Ошибка сети составила err = 0,038. Параметры сети требуют корректировки, что и осуществляет алгоритм Backpropagation algorithm. При втором запуске сети для того же примера привело к ошибке равной err = 0,034. Вторая итерация обучения сети дала снижение ошибки на 0,004. На сотой итерации ошибка составляла $1,763 \cdot 10^{-3}$, на тысячной – $1,333 \cdot 10^{-4}$, на десятитысячной – $1,072 \cdot 10^{-5}$, на стотысячной – $9,028 \cdot 10^{-7}$.

Тестирующий пример входных данных показал адекватность модели нейронной сети получением максимально близкого желаемого результата. Также были исследованы результаты работы сети с другими активацион-

ными функциями в режиме обучения. Результаты получены следующие: для функции $f(x)=th(x)$: на первой итерации ошибка составляла 0,037, на второй – 0,034, на сотой – $1,677\cdot10^{-3}$, на тысячной – $1,301\cdot10^{-4}$, на десятитысячной – $1,065\cdot10^{-5}$, на стотысячной – $9,061\cdot10^{-7}$; для функции $f(x)=e^x\Big/\left(1+e^x\right)$: на первой итерации ошибка составляла 0,038, на второй – 0,034, на сотой – $1,763\cdot10^{-3}$, на тысячной – $1,333\cdot10^{-4}$, на десятитысячной – $1,072\cdot10^{-5}$, на стотысячной – $9,028\cdot10^{-7}$; для функции $f(x)=1\Big/\left(1+x^2\right)$: на первой итерации ошибка составляла 0,034, на второй – 0,033, на сотой – $3,152\cdot10^{-3}$, на тысячной – $1,608\cdot10^{-4}$, на десятитысячной – $1,075\cdot10^{-7}$, на стотысячной – $8,31\cdot10^{-7}$; для функции $f(x)=e^{-x^2}$: на первой итерации ошибка составляла 0,036, на второй – 0,035, на сотой – $3,137\cdot10^{-3}$, на тысячной – $1,588\cdot10^{-4}$, на десятитысячной – $1,065\cdot10^{-7}$, на стотысячной – $8,243\cdot10^{-7}$.

Пример, проиллюстрированный выше, далее развит для прогноза временных функций, с использованием режимных данных за прошедшие с G по G-3 годы для конкретных узлов региональной электрической сети. Анализ погрешностей результатов 24-часового прогноза для рабочих суток по данным указанных лет, варьировался от 3,9 до 2,8 % и, примерно, от 0,4 до 0,6 % больше для нерабочих дней. При прогнозировании среднесуточной нагрузки узлов погрешность не превышала 1,63 %.

Достоинство предложенного подхода заключается в том, что при моделировании функций времени громоздкие методы указанные выше, заменены моделями, использующими элементы искусственного интеллекта, свободных от трудоемких вычислений, и теория о которых последнее время активно развивается.

Библиографический список

1. Фомин, Н.И. Метод определения потерь электроэнергии в питающей сети для задачи комплексной оптимизации схем распределительных электрических сетей / Н.И. Фомин, В.С. Павлюков // Электробезопасность. – 1999. – № 3–4. – С. 3–7.

2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: ИД Вильямс, 2006. – 1104 с.

УДК 621.315.2:621.315.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ANSYS КАРТИНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ 6(10) кВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ И ПРОВЕДЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ

А.В. Коржов, А.Ю. Степанов

Аннотация: в статье представлены отдельные данные моделирования электромагнитного поля силовых кабелей 6(10) кВ, выведены уравнения для расчета магнитного поля методом конечных элементов, приведены углы между векторами электрического и магнитного полей внутри изоляции различных КЛ в нормальном и аварийном режиме работы.

Ключевые слова: силовой кабель 6(10) кВ; компьютерное моделирование; магнитная индукция; метод конечных элементов

Моделированию электромагнитных полей различных устройств посвящены некоторые работы и даже учебники [1–3], однако на данный момент моделирование магнитной составляющей электромагнитного поля вокруг кабельных линий 6(10) кВ освещено недостаточно, так как авторы концентрируются в основном на электрической составляющей.

Одним из методов моделирования является метод конечных элементов, который заключается в нахождении решения дифференциальных уравнений, описывающих, например, электромагнитное поле, в условных точках создаваемой модели, которые называются *узлами сетки*. При нахождении распределения электромагнитного поля токов низких частот можно использовать уравнения Максвелла раздельно для электрической и магнитной составляющей, считая, что их взаимное влияние не вносит значительной погрешности. Тогда решаемые уравнения для магнитного поля будут выглядеть так:

$$\mathrm{rot}(\bar{H}) = \bar{J}; \quad (1)$$

$$\mathrm{div}(\bar{B}) = 0. \quad (2)$$

В таком случае в качестве решения можно искать векторную функцию $\bar{A}$ (векторный магнитный потенциал), для которой верно соотношение:

$$\bar{B} = \mathrm{rot}(\bar{A}). \quad (3)$$

Если считать магнитную проницаемость μ постоянной и равной магнитной проницаемости вакуума, то из уравнений (1) и (3) получается:

$$\mathrm{rot}(\mathrm{rot}(\bar{A})) = \mu_0 \bar{J}. \quad (4)$$

Затем метод сводится к поиску такого решения, которое давало бы как можно меньшую погрешность в узлах сетки при подстановке в уравне-

ние (4). Для оценки погрешности может быть использован метод наименьших квадратов и другие.

В данной работе проведено исследование углов между векторами магнитного и электрического поля для различных КЛ: 3 кабеля АПвП 1×500 мм^2 расположены треугольником, в ряд вплотную друг к другу, в ряд на расстоянии диаметра кабеля; кабель ААШв 3×240 мм^2 (рис. 1). Исследование проводилось с помощью моделирования в программе ANSYS Mechanical, использующей метод конечных элементов. Моделировались нормальный и аварийный режим (двухфазное КЗ). Для анализа нормального режима были отобраны несколько характерных точек для каждого типа КЛ:

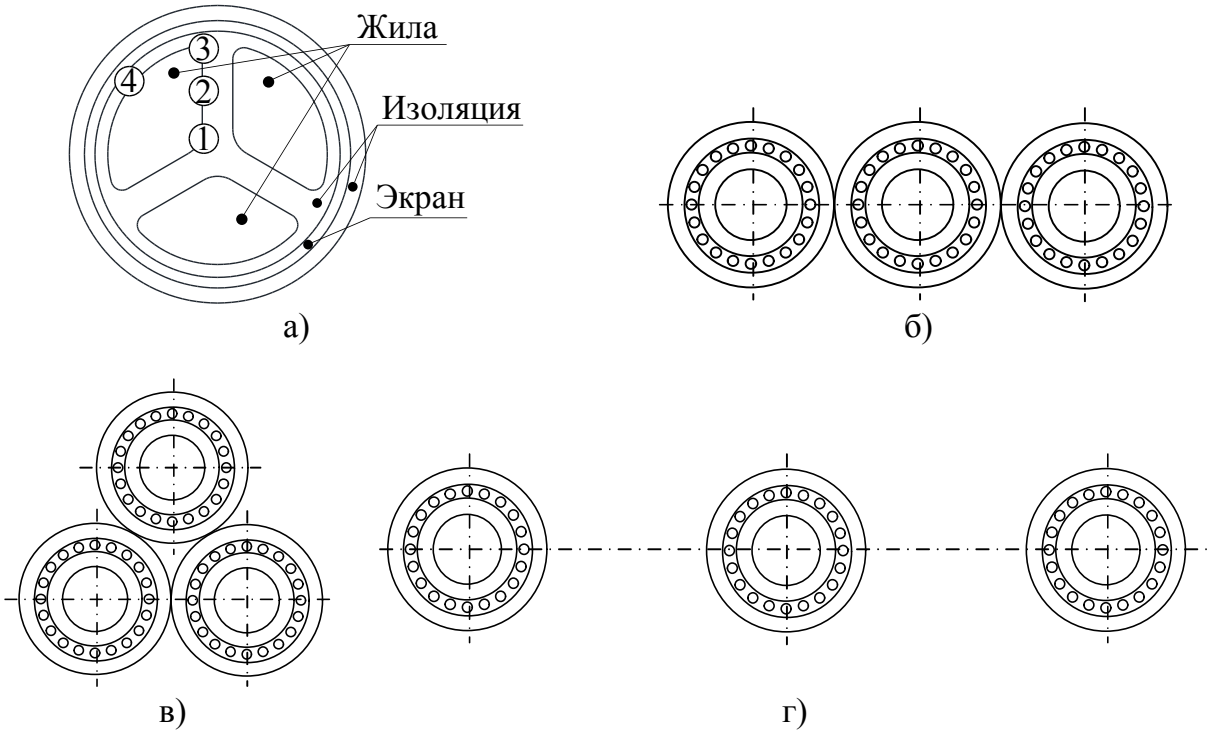


Рис. 1. Исследуемые зоны: а – ААШв 3×240; б – 3 кабеля АПвП 1×500 мм^2 в ряд вплотную друг к другу; в – 3 АПвП 1×500 мм^2 треугольником; г – 3 АПвП 1×500 мм^2 в ряд на расстоянии диаметра кабеля

Для режима КЗ возможно проанализировать всю площадь сечения изоляции участка, находящегося близко к месту КЗ, так как вектора электрического и магнитного полей не вращаются, а пульсируют. Следовательно, углы между ними не меняются в течение периода. Поэтому в табл. 1 приведены относительные времена существования данных углов в течение периода промышленной частоты (один период считается за 100 %), а в табл. 2 – проценты площади сечения изоляции, в которых наблюдается данный диапазон углов (общая площадь сечения считается за 100 %).

Таблица 1

Относительные времена существования углов в симметричном режиме

Тип КЛ	Трёхжильный КЛ, типа ААШв (рис. 1, а)				АПвП треуг. (рис. 1, в)		АПвП впритык (рис. 1, б)				АПвП на расстоянии (рис. 1, г)			
Диапазон углов	Анализируемые зоны согласно рис. 1													
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4
0°≤α<60°	11	5	58	16	5	84	11	5	0	21	0	0	0	11
60°≤α<120°	73	79	32	63	84	11	84	95	79	53	95	100	95	74
120°≤α<180°	16	11	11	16	11	0	0	0	5	26	0	0	0	16
180°≤α<240°	0	5	0	5	0	5	0	0	11	0	0	0	0	0
240°≤α<300°	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0
300°≤α<360°	0	0	0	0	0	0	5	0	11	0	5	0	0	0

Таблица 2

Относительные площади сечения кабеля в режиме двухфазного КЗ

Диапазон углов	Трёхжильный КЛ, типа ААШв	АПвП треугольником		АПвП в ряд. Участвующие в КЗ жилы
		Участвующие в КЗ жилы	Здоровая жила	
0°≤α<60°	57	10	30	10
60°≤α<120°	33	80	35	80
120°≤α<180	10	10	35	10

Полученные данные позволяют сделать несколько выводов:

1. При укладке КЛ одножильными кабелями в плоскости в нормальном режиме в 70 % времени наблюдается диапазон углов от 60 до 120°. Жилы незначительно влияют друг на друга, распределение магнитного поля почти тангенциально.

2. В режиме КЗ в поврежденных жилах однофазных кабелей в 80 % площади сечения наблюдается угол от 60 до 120°. Магнитное поле практически тангенциально.

3. В жиле не участвующей в двухфазном КЗ при расположении треугольником распределение углов равномерно. Это связано с тем, что электрическое поле остается радиальным, а магнитное, создаваемое другими жилами, направлено практически в одном направлении.

4. При двухфазном КЗ в трехжильном кабеле в изоляции преобладают углы в диапазоне 0°≤α<60° (57 %). Это объясняется отсутствием экранирования жил и относительно более близким расположением жил друг к дру-

гу, что сильно искажает картину магнитного поля, так как влияние соседних жил становится более сильным.

Таким образом, исследование показало, что в сечении кабеля наблюдаются характерные зоны с различными пространственными углами между векторами напряжённости электрического и векторов индукции магнитного полей, что необходимо учитывать при проведении экспериментов. Результаты моделирования магнитного поля можно сравнить с результатами, полученными по разработанной ранее математической модели, основывающейся на принципе суперпозиции и законе Био – Савара – Лапласа [4]. Эти результаты могут быть использованы для оценки условий электробезопасности, так как реальные замеры напряженности электромагнитных полей требуют больших временных и материальных затрат.

Библиографический список

1. Соловейчик, Ю.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач : учеб. пособие / Ю.Г. Соловейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения: учеб. пособие для вузов / И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др.; под ред. Е.С. Колечицкого. – М.: Издат. дом МЭИ, 2008. –248 с.

3. Gosz, Michael. Finite element method: application in solids, structures, and heat transfer / Michael Gosz. – CRC Press, 2006. – 400 p.

4. Коржов, А.В. Исследование характера магнитного поля силового кабеля 6(10) кВ с компьютерным моделированием в рабочих и аварийных режимах работы для проведения экспериментальных ресурсных исследований и оценки условий и охраны труда / А.В. Коржов, А.Ю. Степанов // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / под. ред. А.И. Сидорова – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 1. – С. 252–256.

УДК 621.315.2:621.315.61

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6(10) кВ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (Г. ЧЕЛЯБИНСК, Г. НЕФТЕКАМСК)

А.В. Коржов

В статье представлены отдельные данные о повреждаемости изоляции силовых кабелей 6(10) кВ городских электрических сетей по г. Нефтекамску и г. Челябинску. Показана существующая сезонная составляющая прироста пробоев изоляции и наличие статистической зависимости с климатическими данными рассматриваемых регионов.

Ключевые слова: силовой кабель 6(10) кВ; пробои изоляции; корреляция; климатические данные

Учёт в различии в распределении числа пробоев изоляции силовых кабелей 6(10) кВ городских электрических сетей по месяцам для отдельных районов может быть фактором, который позволяет оценивать особенности территории прокладки КЛ, свойства грунта, а также уровня эксплуатации кабельных сетей [1, 2].

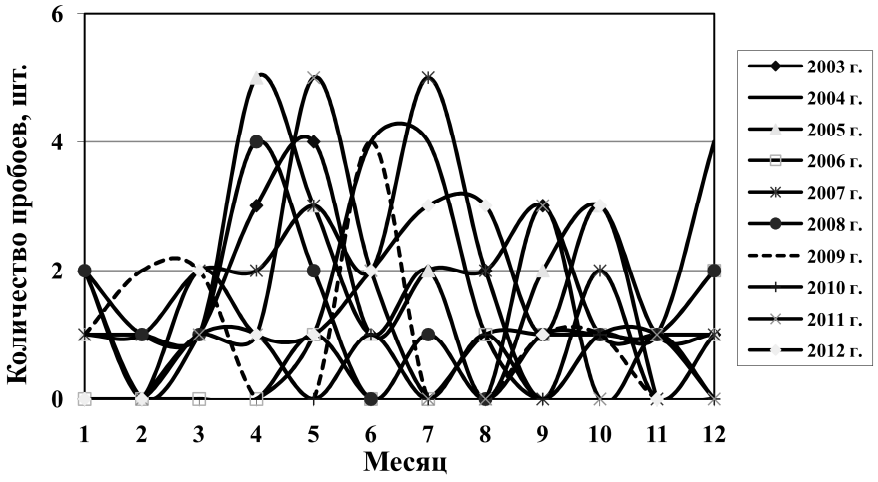
На рис. 1 приведены данные по г. Нефтекамску за период с 2003 г. по 2012 г. Обработанные данные по РЭС г. Челябинска о пробоях изоляции КЛ по месяцам за период с 2010 по 2012 г. включительно приведены на рис. 2.

Анализ по усреднённой тенденции роста пробоев изоляции в весеннее-осенний период и снижения числа повреждений в зимний период, рис. 1, б, следует считать именно усреднённой, учитывая колебания климатических параметров, а именно циклов погоды по региону и разные территории в пределах одного крупного города.

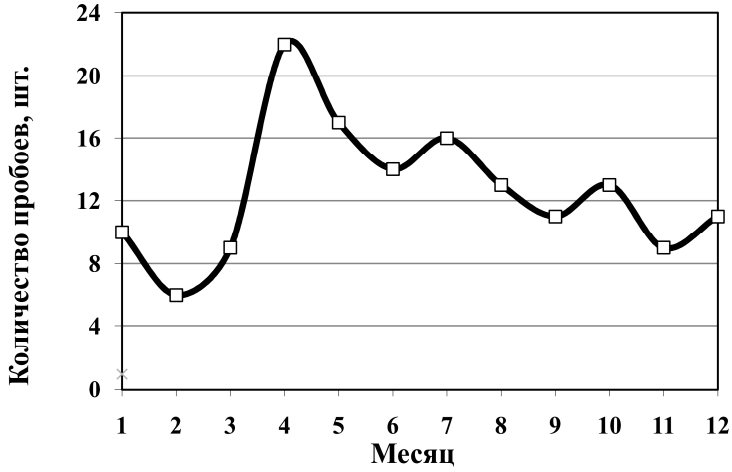
Установлено, что пробой изоляции не происходит мгновенно: время его возникновения зависит как от площади дефекта, так и от параметров окружающей среды. В [3] было показано на основании построения графика, представляющего зависимость математического ожидания повреждений КЛ по месяцам в течение года, что разница между пиками пробоев изоляции кабелей составляет 3 месяца – это период проявления влияния климатических параметров.

Анализ статистической информации по РЭС г. Челябинска и г. Нефтекамска показал, что применение единого значения является не корректным и не позволяет охарактеризовать территорию и строить корректный прогноз.

Данные о количестве повреждений для каждого типа анализируемых КЛ за период с 2010 по 2012 г. в городских кабельных сетях, находящихся в ведении филиала ОАО «МРСК Урала» – Челябэнерго, представлены ниже.



а)



б)

Рис. 1. Зависимости повреждений КЛ 6 кВ по месяцам по г. Нефтекамску:
а – по годам с 2003 по 2012 г.; б – усреднённая за 10 лет

Для нахождения зависимостей и анализа полученных данных были построены графики количества повреждений в зависимости от различных климатических факторов. На рис. 2 представлено количество повреждений КЛ по месяцам для каждого года для двух типов кабелей.

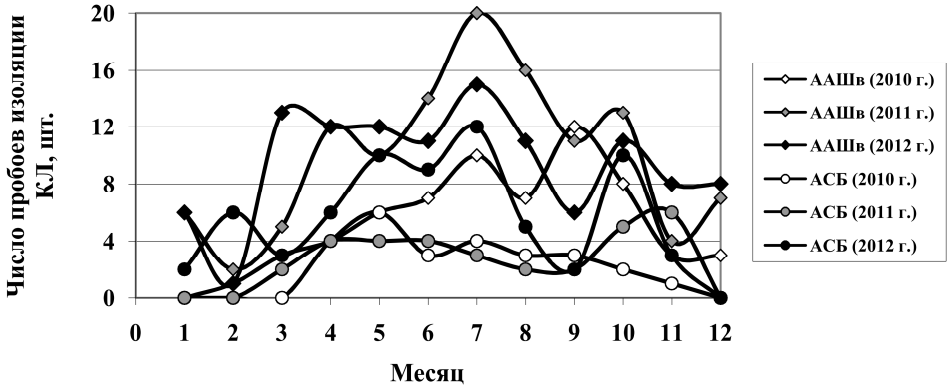


Рис. 2. Количество повреждений КЛ по годам

На рис. 3 и 4 приведены обобщённые данные о повреждаемости изоляции силовых кабелей, в условиях эксплуатации городских кабельных сетей от температуры и влажности. В таблице представлены результаты расчёта коэффициентов линейной корреляции повреждаемости изоляции силовых кабелей, по анализируемым городским кабельным сетям, от климатических параметров.

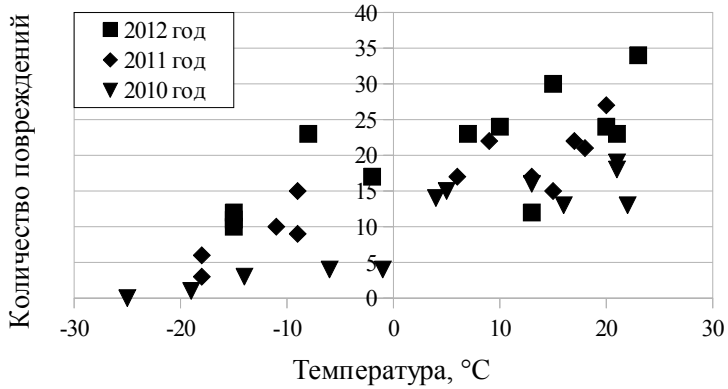


Рис. 3. Зависимость повреждений изоляции КЛ
от среднемесячной температуры

Коэффициенты корреляции повреждаемости изоляции силовых кабелей
за 2010–2012 год от климатических параметров

Марка кабеля	Влажность, %	Осадки, мм	$T_{мин}$, °С	$T_{средн}$, °С	$T_{макс}$, °С
ААШв	–0,709	–0,469	0,828	0,822	0,818
АСБ	–0,909	–0,618	0,801	0,823	0,832
ААБ	–0,521	–0,525	0,513	0,543	0,551
СБ	–0,546	–0,753	0,725	0,711	0,716
Другой	–0,396	–0,6422	0,413	0,401	0,415
Всего	–0,859	–0,749	0,911	0,912	0,919
2011 г.					
ААШв	–0,324	–0,788	0,909	0,898	0,885
АСБ	–0,436	0,103	0,491	0,483	0,474
ААБ	–0,208	0,323	0,171	0,162	0,148
СБ	0,127	–0,392	0,245	0,246	0,245
Другой	0,101	0,091	0,386	0,364	0,339
Всего	–0,363	–0,552	0,913	0,899	0,882
2012 г.					
ААШв	–0,551	–0,196	0,613	0,627	0,611
АСБ	–0,719	–0,567	0,633	0,662	0,672
ААБ	–0,147	0,092	0,053	0,071	0,079
СБ	–0,630	–0,535	0,532	0,565	0,575
Другой	0,147	–0,140	–0,451	–0,415	–0,371
Всего	–0,773	–0,461	0,709	0,742	0,745

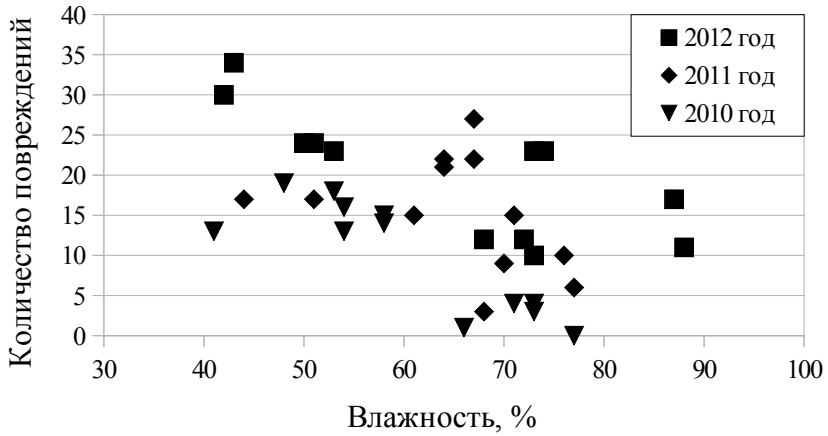


Рис. 4. Зависимость повреждений изоляции КЛ от влажности

Коэффициент корреляции Пирсона для количества повреждений и среднемесячной температуры за период с 2010 по 2012 год по годам равны соответственно: 0,91; 0,89; 0,74. Полученные значения коэффициентов говорят о наличии корреляции между этими величинами. Аналогичные коэффициенты были получены и для других зависимостей.

Коэффициенты корреляции по годам количества повреждений от среднемесячной влажности воздуха равны соответственно: –0,86; –0,36; –077.

Анализ данных о полученных значениях повреждаемости изоляции с климатическими параметрами показал:

1) коэффициенты корреляции меняются в значительных пределах от –1 до 1 и зависят от типа кабелей, года эксплуатации, состояния изоляции кабельной сети;

2) отсутствие корреляционных связей не означает, что нет зависимости повреждаемости изоляции от климатических параметров региона, в данных случаях как правило, наблюдается статистическая функциональная взаимосвязь.

Библиографический список

1. Коржов, А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6(10) кВ городских электрических сетей : моногр. / А.В. Коржов, А.И. Сидоров. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 252 с.

2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский // Электрические станции. – 2008. – № 8. – С. 40–47.

3. Мусин, А.Х. Статистическая модель повреждаемости городских кабельных линий 10 кВ / А.Х. Мусин, В.К. Корхонен // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 23–24.

УДК 621.316.1

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ

В.В. Тарасенко

Рассмотрена возможность снижения потерь в распределительной сети путём изменения её конфигурации в зависимости от изменения нагрузок в различных частях схемы. Разработан алгоритмический блок, который позволяет ускорить работу ранее предложенного алгоритма адаптивной реконфигурации сети путём изъятия из расчётной схемы ветвей, не влияющих на выбор оптимальной комбинации положений коммутационных аппаратов.

Ключевые слова: умная сеть, адаптивная реконфигурация, Smart Grid.

Повышение энергоэффективности производства является неотъемлемой частью повышения конкурентоспособности продукции на рынке. Из известных мероприятий по экономии энергоресурсов наиболее привлекательными всегда являются организационные, так как они дают эффект не требуя значительных капиталовложений. На уровне распределительных сетей 6–35 кВ это может быть управление конфигурацией сети при помощи коммутационных аппаратов, позволяющее снизить потери, путём поддержания оптимальной схемы доставки электроэнергии до потребителя.

Многие компании направляют усилия на повышение интеллектуализации распределительных сетей. В зарубежной литературе такие сети были названы «Smart Grid» [1], что на русский язык можно перевести как «Умные сети». В настоящее время под такими сетями подразумеваются активно-адаптивные электрические сети, которые представляют собой комплекс систем контроля, учёта и управления процессом выработки, передачи и потребления электроэнергии [1]. Применение подобных систем даёт целый ряд преимуществ, среди которых: повышение надёжности, повышение качества электроснабжения, снижение эксплуатационных расходов и др. [2].

Умная сеть предполагает применение дистанционно управляемых коммутационных аппаратов, сейчас для этой цели начинают применяться реклоузеры. Наличие таких аппаратов открывает возможности по дистанционному изменению конфигурации сети. Такая реконфигурация, производимая в зависимости от изменения нагрузок в различных частях схемы, позволяет снизить общие потери электроэнергии в сети. Однако для её осуществления необходим эффективный алгоритм оперативного расчёта конфигурации. Разработке подобного алгоритма посвящён ряд исследований [3–5]. В [6] мною предложен алгоритм, на базе метода окаймляющих мно-

жеств [7], и метода вторых адресных отображений [8]. Получившийся алгоритм вполне работоспособен, но время необходимое для расчёта с помощью него оптимальной конфигурации сети недопустимо велико. В данной статье предлагается ускорить работу алгоритма путём выявления и изъятия из расчёта повторяющихся операций.

В [6] все расчёты производятся на тестовой сети (рис. 1).

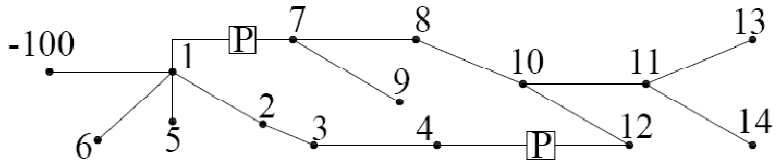


Рис. 1. Схема тестовой сети

На тестовой схеме в ветвях 1–7 и 4–12 символом «Р» обозначены коммутационные аппараты, позволяющие изменять её конфигурацию и соответственно режим работы. Однако на схеме есть ветви 1–6, 1–5, 10–11, 11–13 и 11–14, режим работы которых не изменится при любой конфигурации схемы. В распределительной сети всегда будут подобные ветви. Исключение этих ветвей из расчёта не изменит результаты сравнения различных конфигураций, но позволит ускорить работу алгоритма так как уменьшит число операций, производимых с данными ветвями.

Исходными данными при решении задачи поиска оптимальной конфигурации сети является матрица исходных данных ИД, содержащая сведения об узлах, обозначающих концы ветвей (узлы У1 и У2), о сопротивлениях ветвей R и X, а также о наличии связи между узлами У1 и У2 в данной ветви (столбец Р). Также имеется матрица мощностей узлов МУ, содержащая сведения об активных и реактивных нагрузках в узлах схемы.

ИД =

У1	У2	R	X	Р
−100	1	70	42	1
1	2	38	20	1
2	3	344	162	1
3	4	14	9	1
1	5	53	20	1
1	6	44	26	1
1	7	43	8	Р1
7	9	135	52	1
7	8	58	22	1
8	10	51	19	1
10	12	26	16	1
10	11	56	18	1
4	12	81	31	Р2
11	13	78	30	1
11	14	67	26	1

МУ =

У	Р	Q
−100	0	0
1	0	0
2	540	250
3	88	37
4	164	75
5	219	87
6	56	23
7	710	330
8	253	110
9	69	29
10	253	101
11	160	55
12	77	34
13	44	17
14	56	26

Имея подобные исходные данные для любого положения аппаратов Р1 и Р2 методом окаймляющих множеств можно построить матрицу Сеть(К),

содержащую сведения об узлах начала УН, узлах конца УК и сопротивлениях каждой ветви, а также о нагрузках на конце каждой ветви [6]. Для предложенной сети матрица Сеть(К) при замкнутом положении всех коммутационных аппаратов будет иметь следующий вид:

Сеть(К) =

УН	УК	R	X	P	Q
–100	1	70	42	0	0
1	6	44	26	56	23
1	5	53	20	219	87
1	7	43	8	710	330
1	2	38	20	540	250
7	8	58	22	253	110
7	9	135	52	69	29
8	10	51	19	253	101
10	12	26	16	77	34
2	3	344	162	88	37
3	4	14	9	164	75
4	12	81	31	77	34
10	11	56	18	160	55
11	13	78	30	44	17
11	14	67	26	56	26

Если просмотреть все узлы конца ветвей данной матрицы и найти из них те, которые не являются началом ни для одной ветви, то это будут узлы 6, 5, 13, 14 их ветви из матрицы Сеть(К) можно удалить без ущерба. Если операцию поиска конечных ветвей повторить снова для преобразованной матрицы Сеть(К), то будет найдена ветвь 10–11, которую также из расчёта удаляем. Алгоритм данной операции представлен на рис. 2.

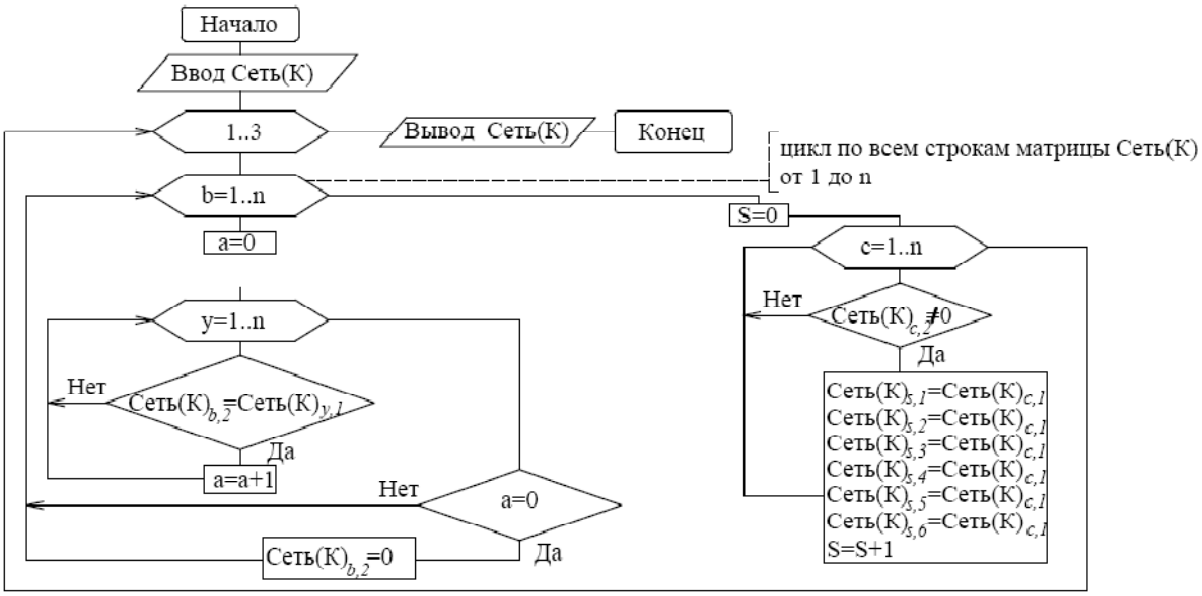


Рис. 2. Алгоритм поиска и удаления конечных ветвей

В итоге матрица Сеть(К) будет иметь следующий вид:

Сеть(К) =

УН	УК	R	X	P	Q
–100	1	70	42	0	0
1	7	43	8	710	330
1	2	38	20	540	250
7	8	58	22	253	110
7	9	135	52	69	29
8	10	51	19	253	101
10	12	26	16	77	34
2	3	344	162	88	37
3	4	14	9	164	75
4	12	81	31	77	34

В таком виде эта матрица должна далее использоваться для выбора оптимальной конфигурации. Удаление ветвей, режим работы которых не изменяется при переключениях коммутационных аппаратов, позволяет снизить объём циклических операций и увеличить скорость работы алгоритма.

Библиографический список

1. Гуревич, В.И. Интеллектуальные сети: новые перспективы или новые проблемы? / В.И. Гуревич // Электротехнический рынок. – 2010. – № 06. – С. 62–67.

2. Кобец, Б.Б. Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова, В.Р. Окороков // ЭнергоЭксперт. – 2010. – № 2. – С. 52–58.

3. Sathish, K.K. Power system reconfiguration and loss minimization for an distribution systems using bacterial foraging optimization algorithm / K.K. Sathish, T. Jayabarathi // Electrical Power and Energy Systems. – 2010. – № 36. – P. 13–17.

4. Olamaei, J. Distribution feeder reconfiguration for loss minimization based on modified honey bee mating optimization algorithm / J. Olamaei, T. Niknam, S.B. Arefi // Energy Procedia. – 2010. – №14. – P. 304–311.

5. Ching-Tzong, S. Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems / S. Ching-Tzong, L. Chu-Sheng // Electric Power Systems Research. – 2001. – № 58. – P. 97–102.

6. Тарасенко, В.В. Алгоритм адаптивной реконфигурации распределительной сети по критерию минимума потерь / В.В. Тарасенко // Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи»: сб. науч. докл. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 422–428.

7. Мантров, В.А. Формирование расчётной схемы распределительной электрической сети 6–10 кВ и анализ её установившихся режимов / В.А. Мантров // Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 62–65.

8. Ющенко, Е.Л. Адресное программирование / Е.Л. Ющенко. – Киев: Техническая литература, 1963. – 288 с.

УДК 621.31 + 621.3:658.382.3

ОЦЕНКА ПРИЧИН ТРАВМАТИЗМА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Е.Ю. Юрченко

По результатам сравнения психологических особенностей электротехнического персонала и студентов выявлены факторы, необходимые для безопасного выполнения обязанностей, а также качества, мешающие безошибочному выполнению работы.

Ключевые слова: травматизм; электробезопасность; индивидуально-психологические особенности.

На сегодняшний день в нашей стране происходит большое число реформ. Изменениям подвергаются практически все отрасли народного хозяйства. Коснулось это и энергетической отрасли. Все попытки реформирования делаются для того, чтобы вывести энергетику России на совершенно новый уровень развития, а также объединить всю энергетическую систему интеллектуальной связью, создав единое целое [1]. Для успешного претворения этих идей обозначены наиболее актуальные направления, которые связаны, с одной стороны, с техникой, а с другой, с человеческим фактором. Статистика несчастных случаев гласит, что доля тяжелых, групповых и смертельных несчастных случаев, имевших место на энергоустановках, составляет 5–8 % от общего числа погибших на производстве. На первый взгляд, цифра не очень большая, но из общего количества несчастных случаев со смертельным исходом на производстве 20–40 % происходит в результате поражения электрическим током. Помимо влияния на человека электромагнитных полей возникают дополнительные вредные и опасные производственные факторы: электрическая дуга, шаговое напряжение, шумовое и психологическое воздействие.

Как показывает анализ, основные причины и предпосылки к несчастным случаям можно разделить на две группы. Первая группа связана с техникой, организацией эксплуатации электрооборудования, контролем качества работы персонала и организационными моментами: низкая надежность технических устройств энергоустановок, влияющих на безопасность проводимых работ; низкая организация эксплуатации энергоустановок, вследствие неэффективной работы служб предприятий; низкая эффективность мероприятий, обеспечивающих безопасность предстоящих работ на энергоустановке и слабый контроль технического состояния и организации эксплуатации энергоустановок [2, 3]. Вторая группа связана с индивидуальными особенностями человека: недостаточный уровень (как психологической, так и квалификационной) подготовки персонала к выполнению приемов, влияющих на безопасность работ; неэффективность

мероприятий по обучению и инструктажу персонала по вопросам безопасности [4].

Количеством несчастных случаев из первой группы можно управлять с помощью организационных мероприятий: проведение проверки знаний по электробезопасности, создание совершенно новых центров сертификации профессиональных квалификаций, экспертно-методических центров в отрасли, пересмотр нормативных документов, касающихся инструктажей, проведение повышения квалификации работников энергетической отрасли [3, 4]. Вторая группа предпосылок является неконтролируемой и зависит от правильности выбора профессиональной сферы. Ошибочные действия работника или нарушение им технологии могут быть связаны с его психоэмоциональным состоянием, которое сложно каким-либо образом описать математически, но оно является предпосылкой к производственному травматизму персонал.

Оценку индивидуально-психологических особенностей личности можно провести с помощью психологических тестов. Наиболее распространенным у психологов является опросник Р. Кеттелла, с помощью которого на одном из промышленных предприятий города Челябинска был проведен опрос электротехнического персонала, имеющего стаж работы от 3 до 30 лет. Для сравнения было проведено аналогичное анкетирование студентов энергетического факультета 3 курса. На рис. 1 и 2 представлены результаты в виде процентного соотношения от общего числа опрошенных. На основании обзора специальной литературы для работников электротехнического персонала все факторы были разделены на три группы:

1) положительные личностные качества, необходимые для безопасного выполнения работником своих обязанностей;
2) отрицательные личностные качества, мешающие безошибочному выполнению работы;
3) качества, не связанные с профессиональной деятельностью.

В результате анализа получена схожесть результатов по факторам «экспрессивность», «доминантность», «жёсткость», «самоконтроль» что означает, что студенты и работники веселые, активные и жизнерадостные люди. Также они характеризуют себя сильными, независимыми личностями, полагающимися только на себя, не терпящими бессмысленности, имеющими тенденцию к сильному контролю своих эмоций и общего поведения.

Опыт и большой стаж делают своё дело. В отличие от студентов, психика у электротехнического персонала «расшатана», так как каждый выезд на объект сопровождается постоянным напряжением. К тому же, работники склонны к медленному пониманию материала при обучении, они предпочитают конкретную интерпретацию. У студентов всё наоборот.

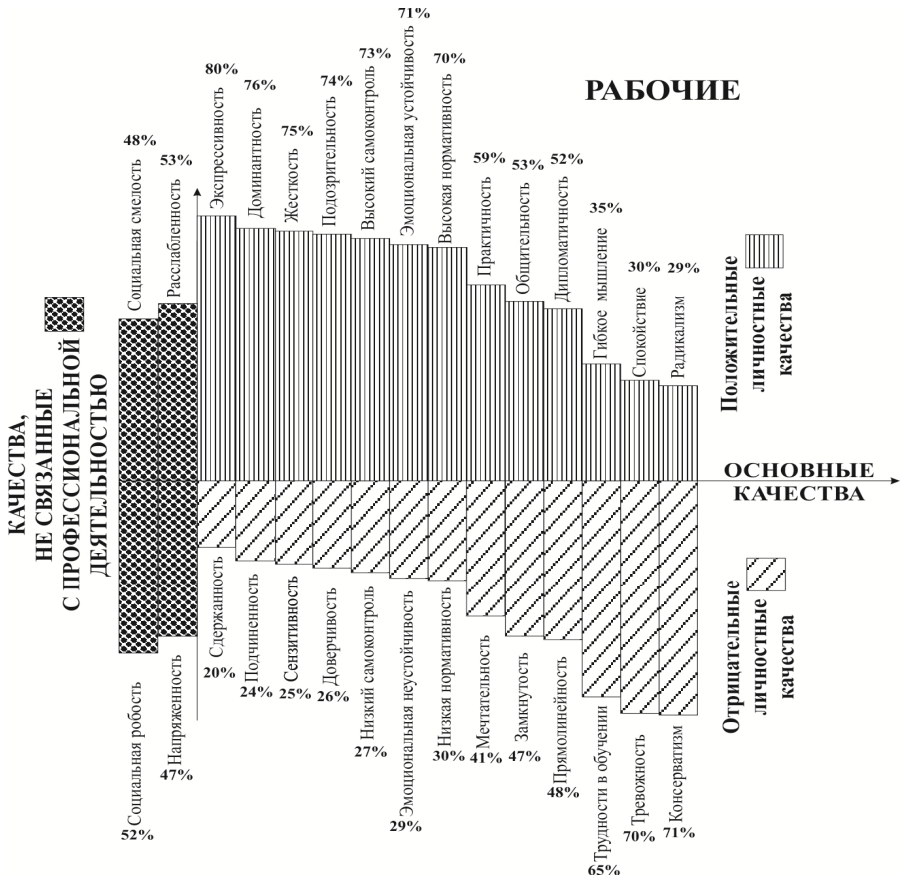


Рис. 1. Диаграмма индивидуально-психологических особенностей рабочих

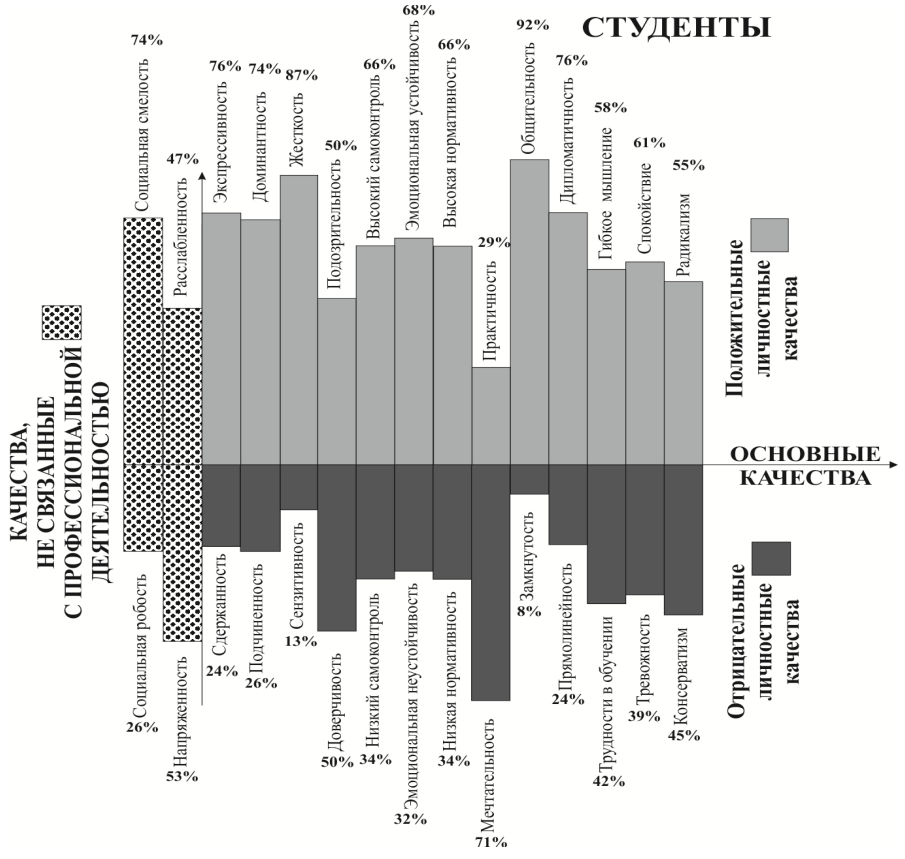


Рис. 2. Диаграмма индивидуально-психологических особенностей студентов

Они экспериментируют, свободно мыслят и имеют сомнения по различным вопросам. Студенты скептичны и стараются вникнуть в сущность идей старых и новых, более интеллектуально развиты, у них более высокая способность к восприятию нового материала.

Таким образом, несмотря на возрастную разницу между работниками и молодыми студентами, некоторые личностные качества не имеют значимых различий. Эти признаки являются неким «психологическим скелетом работника». Часть качеств меняется под влиянием внешних условий и времени. Проводя подобные исследования, можно проследить тенденцию изменения личностных качеств, составить перечень необходимых для профессии качеств, что впоследствии поможет студентам определиться с выбором места работы. Кроме того, знание психологических особенностей необходимо и для руководителей [5]. Следует задуматься не только о том, какие работники приходят на предприятия, но и какие люди, и по какой системе проводят набор кадров в ту или иную организацию.

Библиографический список

1. Родин, М.А. Анализ методов проведения энергетической реформы в России / М.А. Родин, Е.Ю. Юрченко // «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность»: материалы докл. 18-й всерос. науч.-техн. конф. – Томск: ТПУ, 2012.

2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов, А.И. Сидоров, А.Б. Николаевский // Электрические станции. – 2008. – № 8. – С. 40–47.

3. Юрченко, Е.Ю. Анализ последствий от механического повреждения силового кабеля на человека и объекты энергохозяйства / Е.Ю. Юрченко, А.Ю. Лежнев, И.В. Шалимов // Современные техника и технологии: тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых учёных. – Томск: ТПУ. – 2010. – Т. 1. – С. 147–149.

4. Юрченко, Е.Ю. Функции обслуживающего персонала в обеспечении снижения аварийности кабельной сети / Е.Ю. Юрченко // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. – Уфа: УНГТУ. – 2009. – Т. 2. – С. 247–249.

5. Юрченко, Е.Ю. Роль человека в системе «энергетика – безопасность» / Е.Ю. Юрченко, М.А. Родин // Формирование профессиональной культуры специалистов XXI века в техническом университете: тр. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 18–22.

ФИЛИАЛ В Г. ЗЛАТОУСТЕ

УДК 691.54

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕТАКАОЛИНОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

А.А. Кирсанова

Представлены результаты влияния добавки метакаолина в сочетании с суперпластификатором на структуру и свойства цементного камня. Установлено, что метакаолин является добавкой ускорителем набора прочности и модификатором структуры цементного камня.

Ключевые слова: метакаолин, СП-1, повышение прочности, АМД, цементный камень.

Метакаолин (МТК) – это обожженный при температурах 650–850 °С каолин, являющийся высокореакционным материалом, который можно применять в качестве АМД для повышения активности цемента [1]. Многие исследователи [2, 3] утверждают, что метакаолин имеет повышенную водопотребность, снижает расход цемента в бетоне, ускоряет процессы гидратации и твердения цементных композиций, приводит к получению высокой ранней и конечной прочности бетона, при этом среди исследователей нет единого мнения о влиянии МТК на фазовый состав цементного камня.

Цель исследования – изучение влияния МТК и его комплекса с суперпластификатором на формирование структуры и свойств цементного камня с высокой ранней прочностью и стабильностью при эксплуатации.

В работе использовали матакаолин, производства ЗАО «Пласт-Рифей», суперпластификатор СП-1 производства ОАО «Полипласт» г. Новомосковск, ПЦ 500Д0, производства ООО «БРУ» «Невьянский цементник», с водопотребностью 24 %.

Физико-механические свойства цементного камня определяли стандартными методами. Влияние добавок на структурные характеристики камня оценивали: по изменению удельной поверхности гидратных новообразований методом БЭТ; фазовый состав изучали с помощью дериватографии (ДТА), на дериватографе системы «Luxx STA 409» фирмы «Netsch», рентгенофазового анализа (РФА), на дифрактометре ДРОН-3М, (модернизированном приставкой PDWin), а также с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM–700 1F.

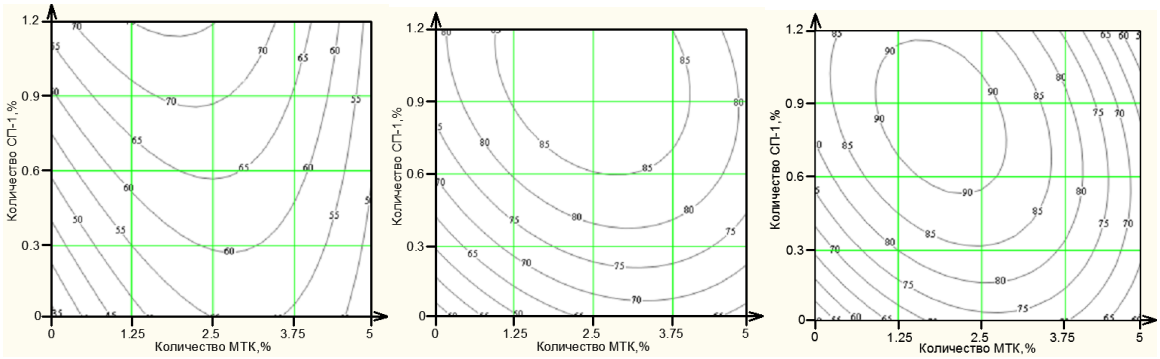
Исследования проводили на образцах-кубах с ребром 2 см, изготовленных из теста НГ и твердевших в нормальных условиях.

Для оптимизации исследования использовали метод математического планирования. Варьируемыми факторами приняты: X – количество МТК от 0 до 5 мас. % от цемента; Y – добавка СП-1, вводилась от 0 до 1,2 мас. %.

Исследование цементного теста выявило, что введение 5 % добавки МТК увеличивает НГ теста по сравнению с бездобавочным на 8 %, что объясняется аморфным состоянием и высокой дисперсностью добавки. Применение МТК (до 5 %) совместно с суперпластификатором СП-1 позволяет снизить количество воды затворения максимально на 29 %. При увеличении дозировок метакаолина этот эффект не сохраняется и применение пластифицирующей добавки малоэффективно [4].

Максимальное снижение сроков схватывания цементного теста наступает при совместном введении МТК (2–5 %) и СП-1 (0,6–1,2 %). Это обусловлено низким количеством воды затворения, диспергирующим действием СП, а также высокой реакционной способностью МТК.

В первые сутки твердения цементного камня набор прочности происходит пропорционально содержанию МТК, при количестве СП-1от 0,6 до 1 % и при максимальном содержании МТК достигает 86 % от марочной прочности бездобавочного.



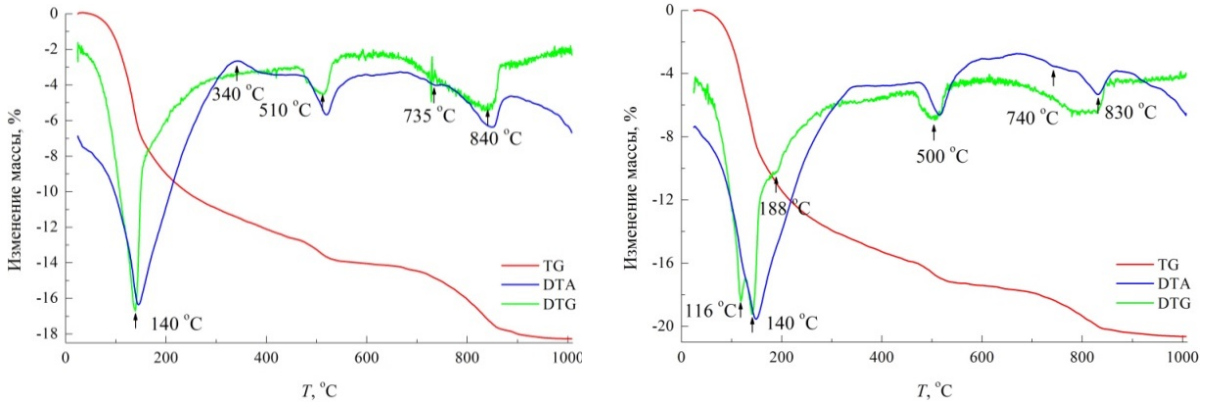
а) б) в)

Рис.1 Прочность в возрасте: а – третьих; б –28 суток; в – 60 суток

На 3-и сутки картина меняется, и наилучшие результаты получены на модификаторе «0,6–1,2 % СП-1 + 1,25–3,5 % МТК» (рис. 1, а). К 28 суткам закономерности влияния добавок на прочностные характеристики цементного камня сохраняются, а марочная прочность с оптимальной добавкой увеличивается на 34 % по сравнению с бездобавочным составом (рис. 1, б). Наибольшей прочности цементный камень с добавкой «СП-1 0,6–1 % и МТК 1,25–3,5 %» из расчета на массу цемента достигает на 60 сутки (рис. 1, в). Следовательно, введение в цемент оптимального количества добавок МТК и СП-1 в расчете на цемент приводит к ускорению гидрата-

ции и получению стабильного камня с высокой ранней и конечной прочностью. Сбросы прочности камня при большем количестве МТК вероятно связаны с процессами перекристаллизации гексогональных гидроалюминатов кальция в кубический C_3AH_6 [5].

Согласно данным ДТА введение 5 % МТК к 60 суткам твердения приводит к образованию камня, состоящего в основном из высокоосновного гидросиликатного геля типа C–S–H(II) (эндоэффект при 140, 740 °С) и метастабильных гидроалюминатов кальция таких как C_4AH_{19} (с эндоэффектами при 116, 188 °С). Эта информация подтверждается сбросами прочности цементного камня в этот период твердения (рис 2, а и 2, б).

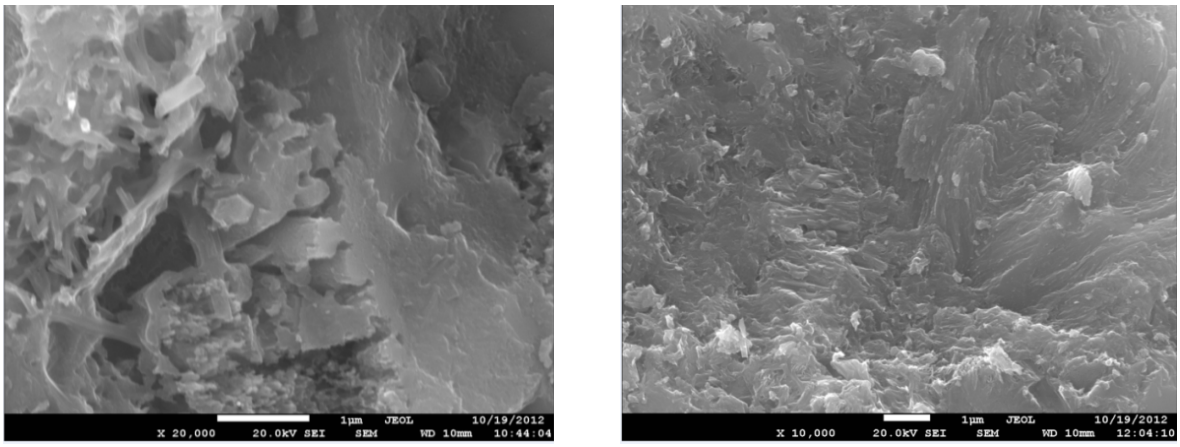


а) б)

Рис. 2. ДТА цементного камня на 60 сутки твердения:
а – с модификатором «2,5 % МТК + 0,6 % СП-1»; б – с 5% МТК

РФА подтверждает данные дериватографии и позволяют установить следующее. Оптимальное количество комплексной добавки формирует камень из $Ca(OH)_2$, высокоосновных ГСК типа C–S–H (II), стабильных кубических гидроалюминатов кальция C_3AH_6. Для всех рентгенограмм характерен повышенный фон в области малых углов, что свидетельствует о присутствии в камне рентгеноаморфных фаз [6].

Исследование цементного камня в электронном микроскопе подтвердили результаты ДТА и РФА. Так при максимальном содержании добавок МТК и СП-1 (рис. 3) на поверхности скола видны продукты перекристаллизации гидроалюминатов, структура камня плотная, но неоднародная. При оптимальном количестве модификатора «ПЦ + 2,5 % МТК + 0,6 % СП-1» структура камня плотная, имеет занозистую поверхность скола и представлена в основном плотно прилегающими друг к другу пластинами.



а) б)

Рис. 3. Структура камня: а – « ПЦ + 5 % МТК + 1,2 % СП-1»;
б – «ПЦ + 2,5 % МТК + 0,6 % СП-1»

Выводы по работе

1. Метакаолин является высокоэффективной добавкой-ускорителем гидратации и твердения цементного камня, а также модификатором структуры.

2. Комплекс МТК + СП вызывают замедление кристаллизации гидросиликатных новообразований, формирование структуры камня предпочтительно из высокоосновных гидросиликатов типа CSH(II), отличающуюся дополнительным присутствием стабильных кубических гидроалюминатов (C_3AH_6) – при оптимальной добавке или нестабильных гидроалюминатов типа C_4AH_{19} – при повышенном количестве метакаолина.

3. Выявлено, что для получения наибольшего эффекта ускорения твердения, получения максимальной прочности и стабильности цементного камня, необходимо использовать комплексную добавку «СП-1 от 0,6 до 0,9 % + МТК от 1,25 до 3,0 %» из расчета на массу цемента.

Библиографический список

1. Платонова, Р.А. Влияние дисперсности каолина месторождения Журавлиный Лог на пуццолановую активность метакаолина / Р.А. Платонова, Т.М. Аргынбаев, З.В. Стафеева // Строительные материалы. – 2012. – № 1.– С. 1–6.

2. Метакаолин в строительных растворах и бетонах / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Изд-во КНУБіА, 2007. – 215 с.

3. Кузнецова, Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т.В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.

4. Гамалий, Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона: автореф. дис. … канд. техн. наук / Е.А. Гамалий. – М., 2009.

5. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: учеб. пособие / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.

УДК 621.774.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ

А.В. Козлов, М.В. Буянов, Е.Г. Шушканов

Рассмотрены исследования остаточных напряжений в поверхностных слоях, возникающих вследствие упругопластических деформаций трубы при гибке с раскатыванием. Напряжения определялись с помощью электролитического травления методом «колец и полосок»

Ключевые слова: холодная гибка, раскатывание, электролитическое травление, остаточные напряжения, метод колец и полосок.

Деформация, возникающая при гибке труб с раскатыванием, существенно влияет на ее эксплуатационные и качественные характеристики [1]. После выполнения процесса гибки, при деформации металла трубы естественно возникают остаточные напряжения в местах изгиба, которые впоследствии влияют на требуемую точность угла гиба трубы, а также на жесткость и стабильность системы трубопроводов в процессе их сборки и дальнейшей эксплуатации, при использовании изделий из труб, полученных по данной технологии. Важнейшим этапом в решении этих задач при использовании данной технологии гибки труб и проектировании систем трубопроводов является определение деформаций, остаточных напряжений и перемещений в элементах трубопроводов, воспринимающих нагрузки [2].

В настоящее время определение остаточных технологических микронапряжений производится в основном двумя методами – механическим и рентгеноструктурным.

Сущность механического метода заключается в измерении деформаций образца при послойном или непрерывном удалении поверхностных слоев с последующим расчетом напряжений. Преимущества механического метода заключаются в возможности быстрого получения эпюры остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, однако это требует разрушения образца, в отличие от рентгеноструктурного метода.

Для удаления слоя металла применяют стравливание и электрополирование [3].

Сущность рентгеноструктурного метода заключается в измерении разности параметра кристаллической решетки, исследуемого металла, в зависимости от ориентации отражающей плоскости по отношению к действующему напряжению. В зависимости от марки материала предварительно

выбирают углы падения первичного пучка лучей, тип излучения, семейство плоскостей, эталонное вещество и др.

Преимуществами метода являются: объективность, отсутствие посторонних факторов, воздействующих на образец в процессе измерения, локальность, возможность определения напряжений без разрушения детали.

Из существующих методов определения остаточных деформаций и напряжений нами был выбран метод электролитического травления.

В качестве образцов использовались кольца и полосы, вырезанные из различных частей трубы диаметром D = 76×3 мм, материал трубы – сталь 10 (рис. 1, 2).

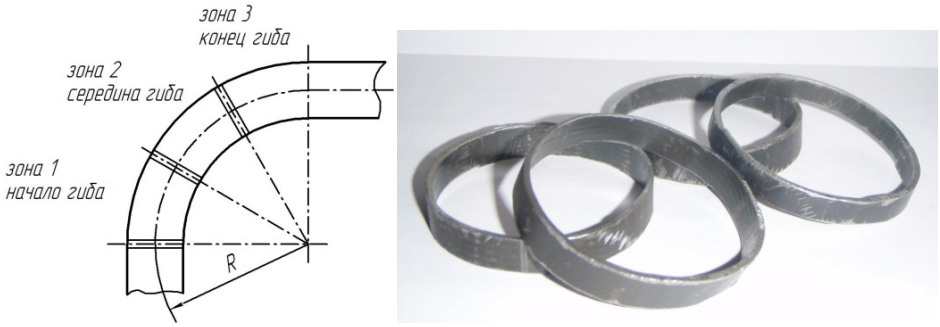


Рис. 1. Схема вырезки колец

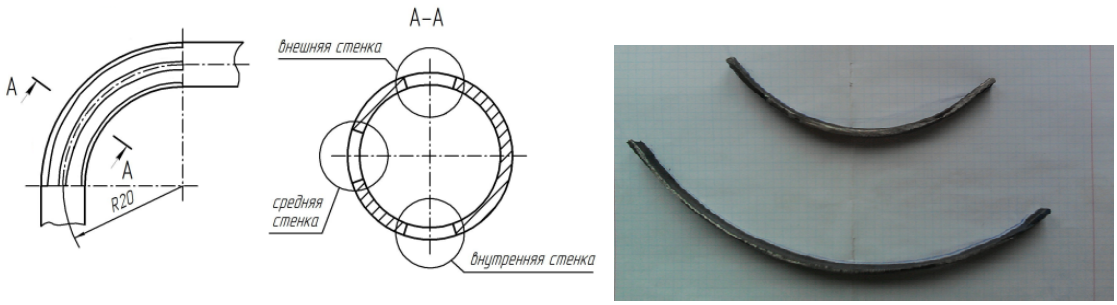


Рис. 2. Схема вырезки полос

Была разработана установка для электролитического травления, схема которой показана на рис. 3. В бак помещен исследуемый образец 1 (кольцо). В качестве электролита использовался раствор поваренной соли 10 % концентрации. В кольцо установлен электрод 3 из медной пластины. К электродам – детали и пластине – подводился ток силой 7 А и плотностью 20 А/дм^2, что вызвало электролитическое растворение внутренней стенки кольца со скоростью 20 мк/мин. Вследствие растворения внутренней стенки из-за наличия в трубе остаточных напряжений, происходит ее деформация.

В процессе исследований были замерены величины деформаций колец и полос, определены зависимости массы от величины стравливаемого слоя, а так же сами эти величины, на основании которых были вычислены окружные и осевые напряжение в разных участках трубы и построены графики зависимости напряжения от глубины (рис. 4, 5).

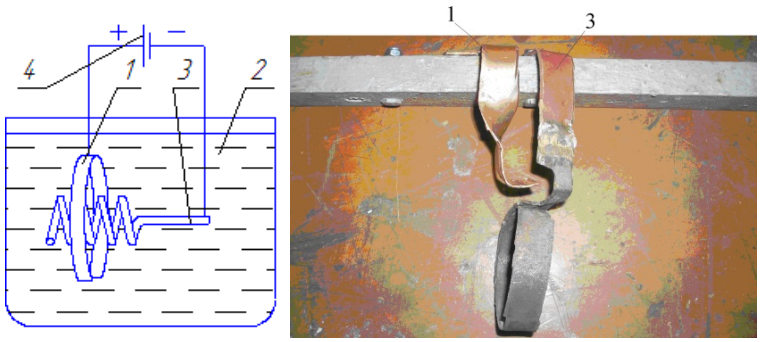


Рис. 3. Установка для электролитического травления: 1 – электрод-анод, 2 – электролит, 3 – электрод-катод, 4 – источник питания

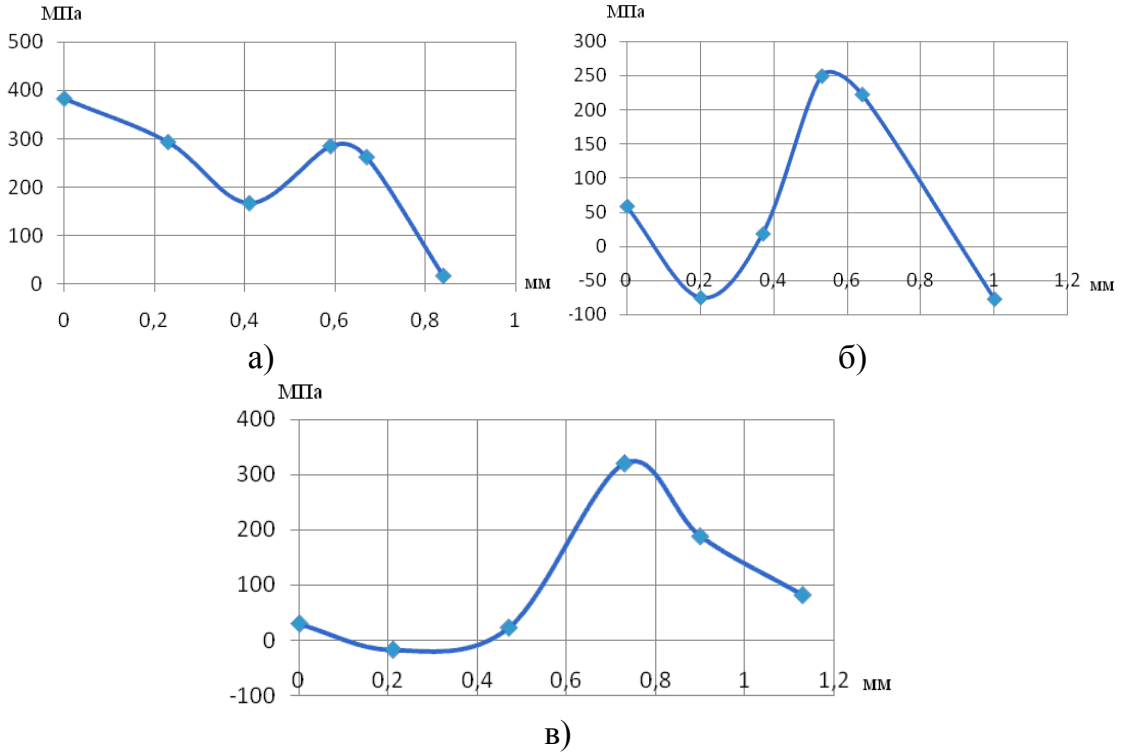


Рис. 4. Графики зависимости окружных остаточных напряжений от глубины залегания: а – распределение окружных напряжений на первом участке; б – распределение окружных напряжений на втором участке; в – распределение окружных напряжений на третьем участке

На графиках видно, что окружные остаточные напряжение максимальны на глубине 0,5…0,7 мм и на поверхности на первом участке трубы. Наибольшие напряжения располагаются на первом участке, но, так как они находятся на поверхности, не могут нанести существенного ущерба. Осевые напряжения так же максимальны на глубине залегания 0,5…0,8 мм. Наибольшие осевые напряжения располагаются на третьем участке. Напряжения имеют растягивающий характер. Данные исследования позволили дать как качественную, так и количественную оценку значений остаточных напряжений и получить более точные данные о напряженном состоянии, возникающем при гибке с раскатыванием.

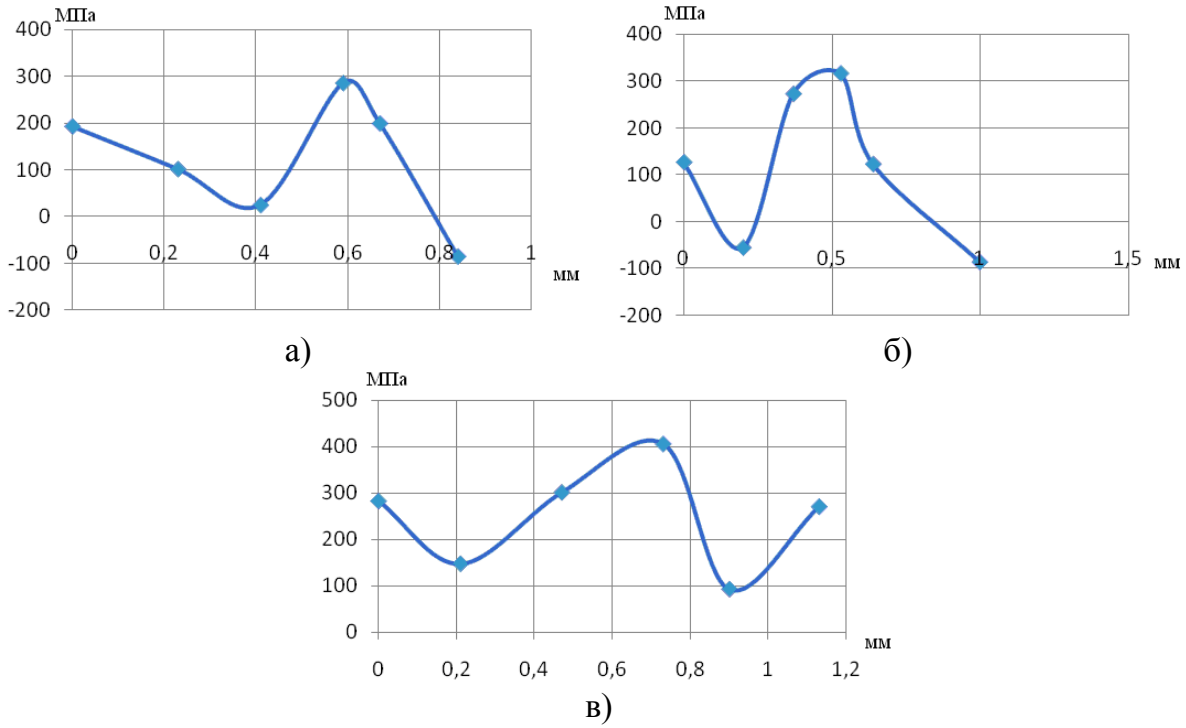


Рис. 5. Графики зависимости осевых остаточных напряжений от глубины залегания: а – распределение осевых напряжений на первом участке; б – распределение осевых напряжений на втором участке; в – распределение осевых напряжений на третьем участке

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: моногр. / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 169 с.

2. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Машиностроение, 1996. – 240 с.

3. Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справ. / Н.И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1983.

УДК 677.01

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМОУСТОЙЧИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Л.Н. Лисиенкова, А.И. Дерябина

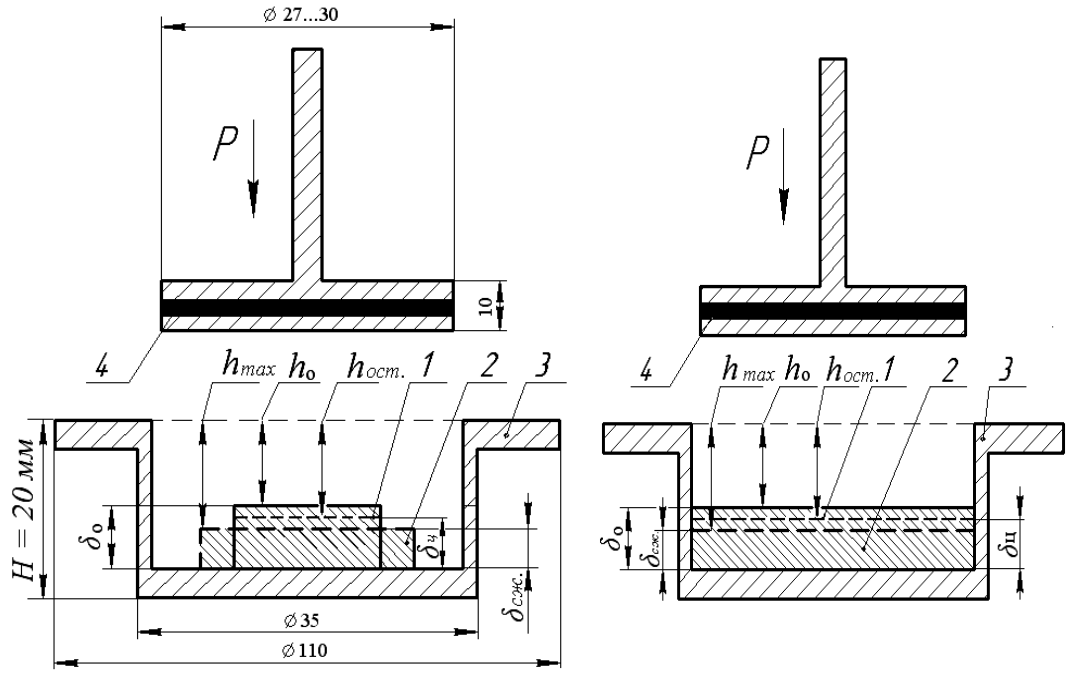
В статье исследовались показатели деформация материалов в условиях циклического сжатия, имитирующих воздействие технологических и эксплуатационных факторов. Показаны конструкция и принцип работы приспособления для сжатия, описана методика оценки показателей деформации материалов, приведены результаты испытаний. Показано, что метод циклического сжатия позволяет прогнозировать поведение материалов в процессах производства и эксплуатации изделий.

Ключевые слова: деформация, циклическое сжатие, волокнисто-сетчатые материалы.

Текстильные волокна в массе и нити часто подвергаются деформации сжатия. Так, многие натуральные волокна (хлопковое, лубяные, шерсть) прессуют для уменьшения занимаемого ими объема, чтобы облегчить транспортировку и хранение; волокнистые материалы используют как набивочные материалы в строительном деле, в мебельном производстве. При переработке волокна сжимаются между различными валами, цилиндрами и другими органами машин.

Свойства материалов и их систем для одежды при сжатии изучены недостаточно. Основной недостаток применяемых методов и показателей состоит в том, что они не отражают влияние на свойства структурных изменений, происходящих в материалах при технологических и эксплуатационных воздействиях. Необходимы показатели, адекватно отражающие свойства материалов, обусловленные структурными изменениями в результате воздействия сжимающих усилий при производстве и эксплуатации одежды.

Разработанное в ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» устройство и приспособление к нему для сжатия материалов (рис. 1), включающее: стальную емкость цилиндрической формы 3 для размещения пробы 1 и съемный индентор 4, в котором между основанием и рабочей поверхностью имеется слой из микропористой резины для обеспечения равномерного давления на пробу [1, 2]. Отличительная особенность методов и средств заключается в возможности моделировать условия сжатия, соответствующие условиям производства и эксплуатации одежды: создавать стесненное или свободное циклическое сжатие материалов, влажную, жидкую или иную внешнюю среду внутри емкости 3 (см. рис. 1) при испытании или в период отдыха пробы.



а) б)

Рис. 1. Схема приспособления для свободного (а), стесненного (б) сжатия материалов: 1 – проба до сжатия; 2 – проба при сжатии; 3 – приспособление для размещения пробы; 4 – индентор

Применение дифференциальных фотодатчиков измерительной системы устройства позволяет измерять толщину пробы бесконтактным способом, что обеспечивает точность измерений.

Давление на пробу осуществляется внешней нагрузкой 0,01–4,0 даН, передаваемой через индентор диаметром 10–30 мм. Экспериментально установлены оптимальные параметры сжатия: рабочие размеры индентора 30 мм, пробы 15–30 мм; время нагружения и отдыха пробы в цикле по 5–30 с, давление на пробу 0,01–3,0 кПа. Относительная случайная ошибка составила 3–12 % для материалов толщиной 0,1–20,0 мм при 10%-ном уровне значимости результата испытания при количестве 10-ти элементарных проб [3].

В результате проведенных исследований получен комплекс показателей, прогнозирующих качественные характеристики материалов при производстве и эксплуатации. Характеристика объектов представлена в таблице.

Для имитации внешних воздействий пробы различающихся по составу и способу производства материалов предварительно подвергали увлажнению в паровоздушной среде до 30 % и последующему сжатию при давлении в цикле 0,2–0,5 кПа.

Характеристика материалов

Название материала	Волокнистый состав, %	Поверхностная плотность, г/м^2	Толщина, мм
1. Ватин холстопрошивной арт. 917618	ВХл – 100	250,0	5,1
2. Ватин холстопрошивной-арт. 927622	ВШрс – 85, ВПэф – 15	200,0	6,1
3. Синтепон арт. СК150/300	ВПэф – 100	140,0	12,1
4. Холлофайбер	ВПэф – 100	130,0	12,0
5. Пальтовая ткань арт. 4514	ВШрс – 67, ВНитр – 33	560,0	3,1
6. Драп «Лор» арт. 3655	ВШрс – 100	650,0	5,6
7. Полотно поперечновязаное плюшевого переплетения	ПрХл – 50, ПрСиб – 50	261,0	1,2
8. Декоративный материал с ворсовым покрытием «флок»	Основа ВХл – 100, Ворс ВПэф – 100	325,0	2,7

Результаты исследований показали, что доля обратимой деформации проб после увлажнения и 100 циклов свободного сжатия (см. рис. 2, образцы 2, 5, 6) значительно больше, чем после стесненного сжатия увлажненных проб, и связаны со строением и свойствами шерстяных волокон. Изменение деформации материалов при циклическом сжатии зависят от состава, строения, климатических условий и параметров испытания проб.

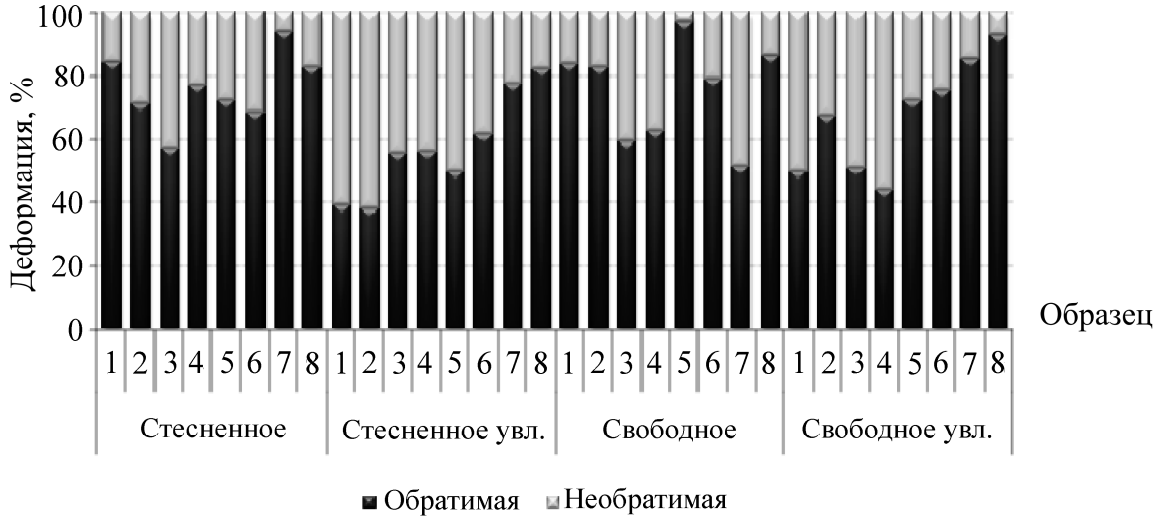


Рис. 2. Деформация материалов после 100 циклов сжатия

Результаты экспериментальных исследований показали, что при внешних воздействиях технологических факторов (влаги и тепла) изменяются деформационные свойства материалов. Изменение свойств материалов

обусловлено перестройкой связей структурных элементов при воздействии влаги и тепла на материалы. Кроме того, механизм деформации структурных элементов зависит от вида сжатия: стесненного или свободного, при которых возникают разные напряжения связей структурных элементов, что приводит к изменению или перераспределению компонент полной деформации материала.

Таким образом, свойства материалов при сжатии зависят от многих факторов, но наиболее важными являются вид полимерного вещества материала, параметры его строения и условия деформирования. Изучение свойств материалов разработанным методом циклического сжатия позволяет получать объективную информацию, необходимую для решения многих задач, связанных с повышением не только эксплуатационных, но и эргономических свойств одежды.

С целью улучшения качества оценки деформационных свойств материалов и их систем для одежды при воздействии технологических и эксплуатационных факторов разработана методика комплексной оценки показателей свойств объектов методом циклического сжатия.

Библиографический список

1. Пат. 2354953 . Российская Федерация, С2, МКИ G01N 3/08. Устройство для определения деформационных свойств кожи и подобных ей гибких материалов / Е.В. Баранова, Л.Н. Лисиенкова, В.И. Стельмашенко, А.В. Саламатин. – № 2007114927; заявл. 20.04.07; опубл. 10.05.09; Бюл. № 13.

2. Лисиенкова, Л.Н. Развитие теории и методов исследования деформационных свойств материалов для одежды при воздействии технологических и эксплуатационных факторов: дис. … д-ра техн. наук: 05.19.01: защищена 23.12.10: утв.08.04.2010 г. / Л.Н. Лисиенкова. – М., 2010. – 270 с.

3. Лисиенкова, Л.Н. Исследование деформационных свойств материалов для одежды методом циклического сжатия / Л.Н. Лисиенкова, Е.А. Кирсанова // Известия вузов. Серия «Технология текстильной промышленности». – 2010 – № 3 – С. 25–28.

УДК 531.717.521

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

С.П. Максимов, А.В. Кондратьев

Используя математический аппарат и предложенную схему измерений, разработана методика контроля торцевых поверхностей, которая может быть использована для построения простых и эффективных настольных измерительных средств на базе ПК.

Ключевые слова: методика; контроль; торцевая поверхность.

Динамическое развитие экономики России невозможно без повышения конкурентоспособности отечественных товаров и услуг, как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Ориентация только на ценовую конкуренцию в современных условиях решающего успеха уже не гарантирует. Определяющим для потребителей во всех странах мира стало качество. Очевидно, что производители должны знать требования, предъявляемые к качеству выпускаемых товаров и контролировать их в процессе производства. Измерения являются неотъемлемой частью любого технологического процесса.

В настоящее время для контроля торцевых поверхностей применяют, как правило, стационарные измерительные приборы, к числу которых относят координатно-измерительные машины (КИМ), настольные приспособления, в том числе и на базе персональных компьютеров. Контроль основан на прецизионном вращении детали и одновременном ощупывании измеряемой поверхности. При этом последовательность и алгоритм выполнения расчетных операции с полученным массивом данных на КИМ являются закрытыми и не могут гарантировать достоверность полученных при расчете данных о контролируемой поверхности.

Используя математический аппарат и предложенную схему измерений [1], в работе предлагается методика контроля торцевых поверхностей, которая может быть использована для построения простых и эффективных настольных измерительных средств на базе ПК.

В первую очередь, для корректных расчетов, предлагается определить положения оси базовой поверхности [2]. После этого определяется аналитическое выражение для прилегающей к исследуемому торцу детали плоскости. Для этого каким-либо образом определяются координаты точек A_1, A_2, …, A_n на исследуемой торцевой поверхности (в нашем случае с помощью датчиков линейных приращений) (рис. 1).

После замера точек для определения прилегающей плоскости через каждые три точки проводится плоскость. Затем определяется, не лежит ли

какая-либо измеренная точка за пределами проведенной плоскости. Для этого необходимо определить абсциссы (X) точек пересечения прямых, параллельных оси X и проходящих через рассматриваемые точки с проведенной плоскостью [3].

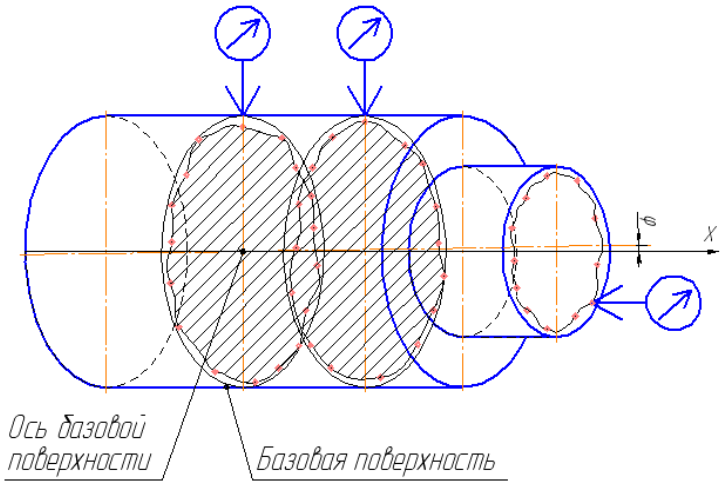


Рис. 1. Схема замера торцевой поверхности

Поставленное условие проверяется следующим образом. Прямая, параллельная оси X, представляет собой бесконечное множество точек с постоянными y и z, при $x \in (-\infty; +\infty)$. Точки пересечения таких прямых с плоскостью, проведенной через 3 точки, определяются подстановкой координат y и z в уравнении плоскости. Таким образом, определяется единственное неизвестное – координата X пересечения прямой, параллельной оси X, с плоскостью, и сама точка пересечения прямой и плоскости. После чего выясняется, лежит ли эта точка правее или левее плоскости (если X точки пересечения прямой проведенной через точку с плоскостью больше чем X самой точки, то плоскость лежит правее, и наоборот).

Если абсцисса пересечения образующей с плоскостью, которая проведена через три точки меньше абсциссы замеренной торцевой точки, то такая плоскость не может быть прилегающей. Тогда выбираются следующие три точки (A_1, A_2, A_3) и расчеты повторяются, т. е. производится перебор по три точки.

В общем случае, могут быть определены несколько прилегающих плоскостей. В связи с этим встает вопрос определения именно прилегающей плоскости (плоскость, соприкасающаяся с реальной поверхностью и расположенная вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реальной поверхности в пределах нормируемого участка имело минимальное значение).

Ближайшая прилегающая плоскость может быть определена через периметр треугольника с вершинами в точках, через которые строится плоскость (рис. 2).

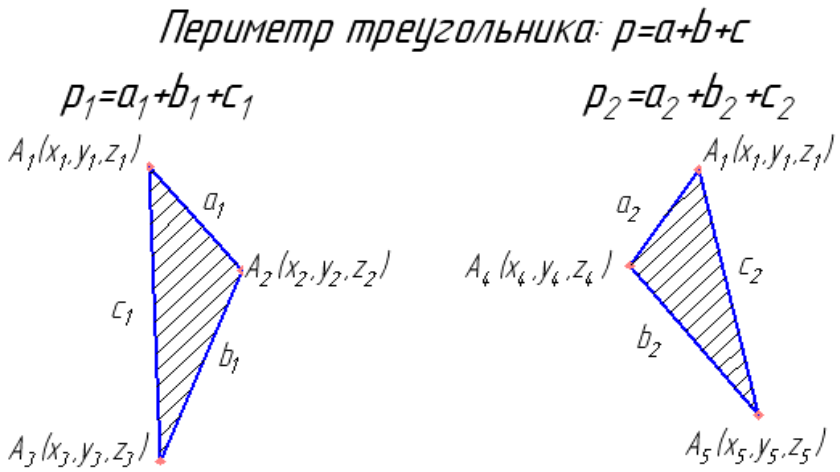


Рис. 2. Выбор прилегающей плоскости из множества

a, b, c – стороны треугольника, построенные по 3 выбранным точкам:

$$a = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2},$$

$$b = \sqrt{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 + (z_k - z_j)^2},$$

$$c = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}.$$

Чем больше такой периметр – тем ближе прилегающая плоскость к измеряемой поверхности. Эта плоскость и учитывается в дальнейших расчетах.

Зная аналитическое выражение для оси базовой цилиндрической поверхности и для прилегающей плоскости можно определить угол отклонения оси базовой поверхности от прилегающей плоскости к торцовой поверхности детали.

Угол ψ между прямой и плоскостью определяется по формуле:

$$\sin(\psi) = \pm \frac{|Al + Bm + Cn|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}},$$

где A, B, C – коэффициенты из уравнения плоскости проведенной через три точки.

Для определения направляющих коэффициентов l, m и n рассмотрим каноническое уравнение прямой, которое имеет вид

$$\frac{x - x_1}{l} = \frac{y - y_1}{m} = \frac{z - z_1}{n},$$

где: l, m, n – направляющие коэффициенты.

Если прямая параллельна оси X, то $m = 0$ и $n = 0$, а каноническое уравнение приобретает вид

$$\frac{x - x_1}{l} = \frac{y - y_1}{0} = \frac{z - z_1}{0}.$$

Тогда угол ψ между прямой и плоскостью определяется по приведенной формуле:

$$\sin(\psi) = \frac{|Al|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\sqrt{l^2}} = \frac{|A|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

$$\psi = \arcsin\left(\frac{|A|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}\right).$$

Этот угол и является угловым отклонением от перпендикулярности. Так как отклонение от перпендикулярности – это отклонение угла между плоскостями от прямого угла (90°), выраженное в линейных единицах *EPR* (согласно ГОСТ 24642–81) на длине нормируемого участка $L = 2R$, где $2R$ – длина нормируемого участка, диаметр, на который настроен датчик, собирающий координаты точек, то

$$\mathrm{tg}(\psi) = \frac{EPR}{2R},$$

$$EPR = 2R\,\mathrm{tg}(\psi) = 2R\,\mathrm{tg}\left(\arcsin\left(\frac{|A|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}\right)\right).$$

Торцевое биение *ECA* определяется как разность наибольшего и наименьшего расстояний от точек реального профиля торцевой поверхности до плоскости, перпендикулярной к базовой оси:

$$ECA = x_{\max} - x_{\min}.$$

Представленная методика определяет последовательность и описывает математический аппарат, используемый при определении торцевого биения и отклонения от перпендикулярности, которая может быть использована для построения простых, компактных, но эффективных средств размерного контроля на базе ПК, которые с успехом могут найти применений на предприятиях отечественного машиностроения.

Библиографический список

1. Пат. 2348006 Российская Федерация. Способ размерного контроля поверхностей деталей, имеющих круглые сечения / С.Г. Чиненов и др. – № 2007126311; заявл. 10.07.07; опубл. 27.02.09; Бюл. №6.

2. Чиненов, С.Г. Математическое моделирование операций комплексного размерного контроля деталей машин / С.Г. Чиненов, Я.В. Высогорец, С.П. Максимов // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 8 (55). – С. 172–176.

3. Пат. 2471145 Российская Федерация. Способ контроля параметров точности торцевых поверхностей деталей типа «тело вращения» / С.Г. Чиненов, Я.В. Высогорец, С.П. Максимов. – № 2011132698; заявл. 03.08.11; опубл. 27.12.12; Бюл. № 36.

УДК 621.774.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПРИ ХОЛОДНОЙ ГИБКЕ ТРУБ ОБКАТЫВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО ДИНАМОМЕТРА

К.А. Миронов, А.В. Козлов, Н.В. Иванов

Предложена новая технология холодной гибки труб с обкатыванием, позволяющая производить гибку без нарушения внутреннего покрытия. Определены максимальные усилия возникающие при гибке труб с обкатыванием.

Ключевые слова: холодная гибка, обкатывание, механический динамометр, изгибающие усилия.

Изготовление криволинейных деталей водопроводных и теплопроводных сетей диаметром свыше 100 мм в холодном состоянии из-за больших усилий сопряжено с гофрообразованием и сплющиванием трубы в процессе ее гибки. Гибка труб большого диаметра осуществляется, как правило, с применением общего или узкозонального нагрева (например, токами высокой частоты), что требует значительных энергозатрат и применения дорогостоящего оборудования.

В ЮУрГУ разработана не имеющая аналогов технология холодной гибки труб большого диаметра и оборудование для ее реализации [1]. В основе новой технологии лежит создание в изгибаемой трубе перемещающейся кольцевой пластической зоны, в каждой точке которой под воздействием сосредоточенных радиальных сил возникают знакопеременные изгибные напряжения стенок трубы. В результате при приложении к трубе относительно небольшого изгибающего момента в перемещающейся кольцевой зоне происходит гибка трубы. Одним из наиболее простых способов такого воздействия на изгибаемую трубу является ее раскатывание вращающимся шариковым или роликовым раскатником, заведенным в трубу со значительным натягом.

В настоящее время для монтажа трубопроводов все чаще применяют трубы с различными видами защитного покрытия на внутренней части трубы. Применение для гибки таких труб оборудования с раскатыванием изгибаемой трубы нежелательно либо невозможно из-за опасности повреждения защитного покрытия. В то же время при обкатывании трубы вращающимся обкатником труба в поперечном сечении испытывает деформации, аналогичные раскатыванию, что также должно способствовать существенному снижению изгибающих усилий.

При воздействии шариками обкатной головки на поверхность трубы, стенка трубы прогибается внутрь непосредственно под самим шариком, а в местах, где давление шарика отсутствует, стенка трубы прогибается в дру-

гую сторону, тем самым создаются знакопеременные деформации стенки трубы[2].

Для экспериментальной проверки этого метода была спроектирована специальная обкатная головка (рис. 1), состоящая из следующих элементов: деформирующие шарики 1, опорные конусы 2 и 3, установленные в корпусе 4. Крутящий момент передается от электродвигателя, через ременную передачу шкиву 5, связанному с корпусом 4. Труба 6 установлена в гильзе 7 [3].

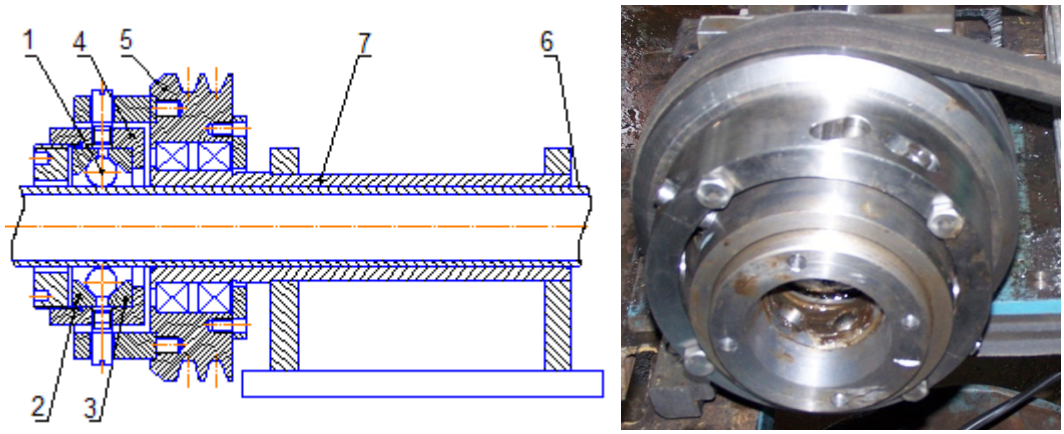


Рис. 1. Обкатная головка

Первоначальной целью экспериментов было уточнение технологических возможностей нового метода. В итоге были получены следующие результаты:

1) радиус гибки обеспечивается в пределах 3,5–5D трубы;

2) при гибке трубы с обкатыванием сохраняется внутреннее защитное покрытие трубы.

Для получения экспериментальных данных об усилиях гибки при различных параметрах в прижимной механизм был установлен динамометр. За основу был принят серийный динамометр сжатия модели ДС-3, так как он подходит по габаритным размерам и основным характеристикам. Динамометр расположен между винтом и прижимным роликом. Было разработано приспособление для крепления динамометра на установке.

Внешний вид установленного динамометра представлен на рис. 2.

В качестве образцов для проведения эксперимента была использована труба из стали 20 длиной 1200 мм, диаметром 60 мм, с толщиной стенки 3 мм.

Была проведена серия экспериментов на различных режимах гибки, главными из которых являются натяг в обкатной головки и скорость продольной подачи трубы.

Выполнено измерение усилия гибки трубы без использования обкатного инструмента. Измерения производились при подаче 80 мм/мин. Полученное усилие составляет 22 500 Н, что совпадает с теоретически рассчитанным значением [4].

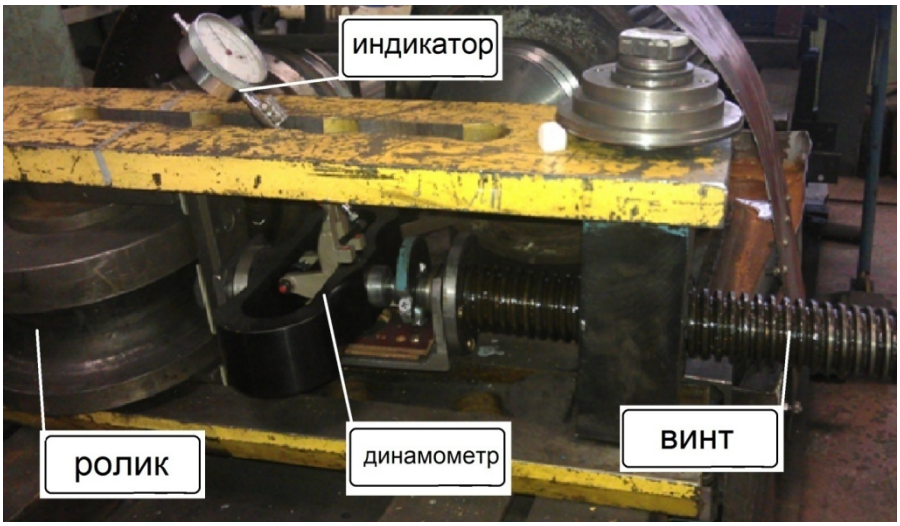


Рис. 2. Динамометр на прижимном ролике

На рис. 3 представлен один из образцов, который был обработан на лабораторной установке.

Рис. 3. Образец после обработки

Полученные результаты измерений представлены в таблице.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1) усилие гибки при воздействии на трубу обкатного инструмента в 1,5–2,7 раза (в зависимости от режима работы установки) ниже, чем усилие гибки без использования обкатного инструмента;

2) наименьшее усилие гибки достигалось при минимальном значении продольной подачи. При увеличении подачи в 4 раза усилие гибки трубы возрастает на 11,5–20,5 %.

Полученные в ходе исследования результаты позволят уточнить режимы гибки и параметры оборудования.

Результаты проведения эксперимента

Натяг, мм	Подача, мм/мин	Максимальное усилие в момент нагрузки, кН	Усилие гибки в установившемся режиме, кН
0,7	20	11,0	8,5
	40	13,5	9,0
	80	15,5	9,5
1,5	20	13,0	11,0
	40	12,0	15,5
	80	9,5	7,5
2	20	9,5	7,5
	40	11,5	9,5

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: моногр. / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 169 с.

2. Козлов, А.В. Новая технология гибки труб / А.В. Козлов, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. – Челябинск: ЧГТУ, 1993.

3. Козлов, А.В. Холодная гибка с воздействием на изгибаемую трубу вращающимся раскатником-обкатником / А.В. Козлов, И.П. Дерябин // Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте: тр. междунар. конф. – Самара: СамГТУ, 1999. – Ч. 1.

4. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 608 с.

УДК 677.075

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Ю.С. Мязина

В статье исследовались деформация трикотажных полотен в условиях циклического растяжения, имитирующих технологические и эксплуатационные факторы.

Ключевые слова: деформация трикотажных полотен, циклическое растяжение.

В процессе эксплуатации одежда испытывает разнообразные воздействия со стороны тела человека (многократно повторяющееся растяжение, воздействие влаги и тепла), которые, в силу их различной интенсивности на отдельных участках, необратимо изменяют форму поверхности одежды, что приводит к потере внешнего вида.

Обычно материалы деформируются в результате действия усилий, величины которых значительно меньше разрывных. При эксплуатации трикотажных изделий напряжение от растяжения трикотажа составляет около 0,1 МПа.

При эксплуатации на материал действуют небольшие нагрузки, которые, чередуясь с разгрузкой и отдыхом, расшатывают структуру материала и приводят к его ослаблению; происходящие при этом изменения в размерах и форме материала на отдельных участках одежды значительно ухудшают ее внешний вид.

Изучение получаемых при испытаниях в цикле нагрузка – разгрузка – релаксация характеристик механических свойств трикотажных полотен представляет большой интерес, а результаты подобных исследований могут использоваться при конструировании деталей одежды, ее изготовлении, при разработке новых материалов с улучшенными свойствами [2].

Таким образом, основным фактором изменения формы и размеров одежды является накопление циклической остаточной деформации, изменение плотности трикотажа, т. е. повышение его однородности. Изменяется толщина полотна, на отдельных участках образуются вздутия (в области локтя, колена и др.)

Растяжимость материалов учитывается при проектировании изделий из них. Так, при изготовлении плотно облегающего изделия из материалов с высокой растяжимостью детали выкраиваются меньшего размера, чем из материалов с меньшей растяжимостью. При этом учитывается требование сохранения условий для нормального кровообращения и других физиологических процессов в организме человека. Считается, что, с учетом ска-

занного, предельно допустимая величина давления на тело человека не должна превышать 133…200 Па, на участке плотного облегания давление P на тело прямо пропорционально напряжению g, возникающему в полотне при растяжении в поперечном направлении, и обратно пропорционально радиусу кривизны R контура поперечного сечения изделия. Таким образом, при равном нагружении (равной отрицательной прибавке) давление на тело полотен, обладающих разной растяжимостью, различно.

При проектировании изделий бытового назначения из эластомерных полотен в качестве исходных данных берутся величины растяжения изделия в носке. Растяжение элементов одежды при движении по данным составляет в области плеч – 13…16 %, а области колен и локтей – 35…45 %, в области бедер – 25…30 %.

Объектами исследования деформации при проведении данного эксперимента являются образцы трикотажных полотен плательно-костюмной группы различных переплетений и волокнистого состава. Пробы трикотажных полотен отобраны в соответствии с ГОСТ 8844–75. Характеристики отобранных образцов представлены в таблице.

Характеристика трикотажных полотен

Образец	Переплетение	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м^2	Волокнистый состав, основа/уток	Плотность вязания, число петель/10 см основа/уток
№ 1	Гладь	0,576	205,40	ВХл	Пг=100 Пв=140
№ 2	Пике	0,497	146,92	ВПэф	Пг=60+120 Пв=220
№ 3	Двуластик	1,169	279,20	ВПэф, ВШр	Пг=111+111 Пв=250
№ 4	Двуластик	1,19	261,00	ВХл, ВСиб	Пг=130+130 Пв=326
№ 5	Двугладь	1,109	221,80	ВПэф, ВПур	Пг=300+300 Пв=500

Исследование деформации материалов проводилось на разработанном в ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» устройстве и приспособлении к нему [1].

На рис. 1, 2 представлены диаграммы относительной деформации образцов в условиях, многоосного растяжения образцов.

Анализ результатов расчета, полученных при испытаниях показал, что величина упругой деформации при одноосном растяжении у образца № 4 в 4,4 раза превышает данный показатель для образца № 2 и в 2 раза для образца № 3.

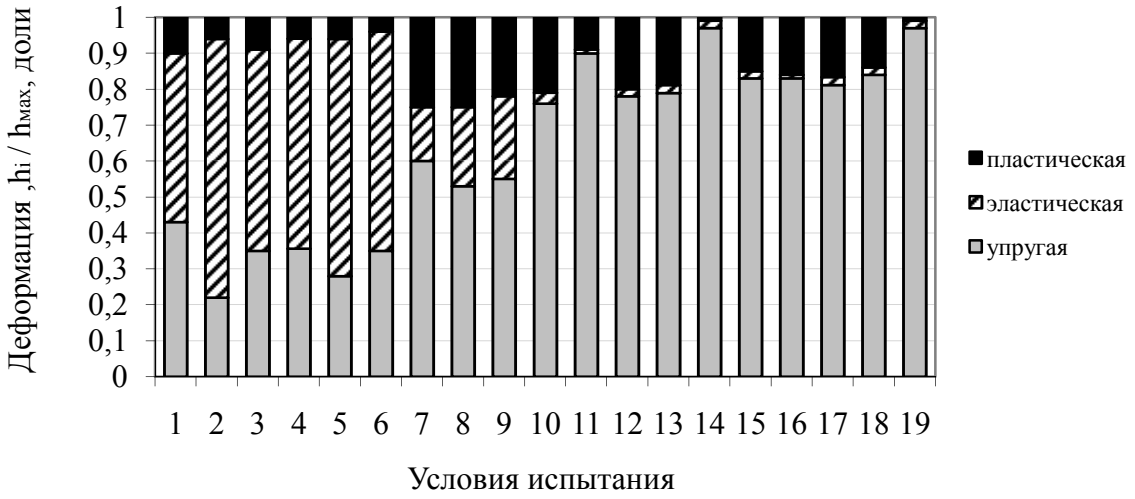


Рис. 1. Относительная деформация образцов № 1–5 в условиях: 1–9 – одноосного (образцы № 2, 3, 4); 10–14 – образцы № 1–5 (D/d = 25/15, tнагр/totд = 10/10); 15–19 – образцы № 1–5 (D/d = 40/35, tнагр/totд = 10/10) одноциклового растяжения

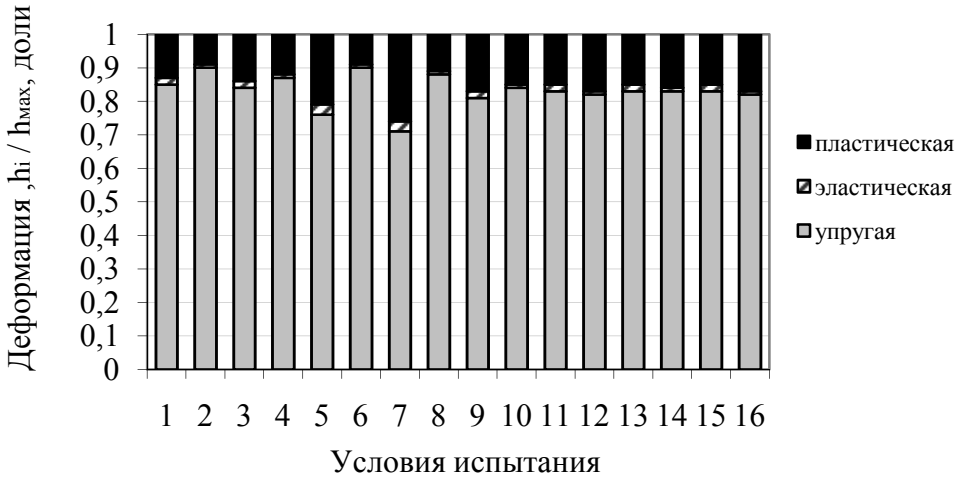


Рис. 2. Относительная деформация образцов № 1, 2 соответственно при нагрузке: 1, 2 – 0,2 даН; 3, 4 – 0,5 даН; 5, 6 – 1 даН; 7, 8 – 1,5 даН (D/d = 25/15, tнагр/totд = = 10/10); 9, 10 – 0,2 даН; 11, 12 – 0,5 даН; 13, 14 – 1 даН; 15, 16 – 1,5 даН (D/d = 40/35, tнагр/totд = 10/10)

Это обусловлено высокой упругостью при растяжении трикотажных полотен. Доля упругой компоненты для образца № 4 также выше на 40–60 % по сравнению с образцами № 2, 3. Пластическая часть деформации при двухосном растяжении проявляется в меньшей степени у образца № 5 и в большей – у образцов № 1, 3, 4, что обусловливает лучшие деформационные свойства хлопковых и полушерстяных трикотажных полотен, полученных по двум обозначенным методикам, что связанно с существенными различиями в условиях испытания материалов. Поэтому, сравнение результатов испытаний нам представляется не вполне корректным. Однако

общие тенденции, выявленные при оценке упругопластических свойств образцов по общепринятой методике, сохраняются и при испытаниях на двухосное растяжение: вложение полиуретановых нитей повышает упругую деформацию и эластичность трикотажа, а содержание хлопковых и шерстяных волокон обеспечивает пластичность материала и лучшие формовочные свойства. Преимущества предлагаемого способа заключаются в возможности реализации не только одноциклового одноосного, но и двухосного растяжения и оценке исходных свойств (например, деформационных). Основной интерес представляет возможность изучения релаксационных процессов в условиях многоциклового растяжения материалов при различных режимах и нагрузках. Данное направление является целью последующих исследований.

Библиографический список

1. Пат. 2354953 Российская Федерация, С2, МКИ G01N 3/08 Устройство для определения деформационных свойств кожи и подобных ей гибких материалов / Е.В. Баранова, Л.Н. Лисиенкова, В.И. Стельмашенко, А.В. Саламатин. – Заявка № 2007114927; заявл. 20.04.07; опубл. 10.05.09; Бюлл. № 13

2. Лисиенкова, Л.Н. Развитие теории и методов исследования деформационных свойств материалов для одежды при воздействии технологических и эксплуатационных факторов: дис. … д-ра техн. наук: 05.19.01: защищена 23.12.10: утв. 08.04.2010г. / Л.Н. Лисиенкова. – М., 2010. – 270 с.

УДК 621.9.042-529 + 621.92.06-529

ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

С.П. Пестов

Проведен анализ и выполнена оценка жесткости элементов технологической системы, которые могут быть использованы в моделях точности этапа формообразования отверстий концевыми мерными инструментами. Рассмотрены расчётные схемы элементов технологической системы для переднего и заднего направлений режущих инструментов для станков с ЧПУ.

Ключевые слова: жесткость; технологическая система; элементы для направления; переднее направление; заднее направление; концевые мерные инструменты; станки с ЧПУ.

На современном этапе развития машиностроения возрастают требования к обеспечению повышенных параметров точности поверхностей обрабатываемых деталей на металлорежущих станках, в том числе, станках с ЧПУ. Поэтому необходима разработка новых и уточнение существующих методов моделирования точности обработки различных поверхностей, включая отверстия. В моделях точности этапа формообразования отверстий концевыми мерными инструментами [1] присутствует величина J, определяющая жесткость применяемых элементов технологической системы. В общем случае, смещение δ оси инструмента по координатным осям X и Y существенно зависит, в соответствии с моделями формообразования, от жесткости режущих и вспомогательных инструментов, а также – при наличии элементов для направления режущего инструмента – и от жесткости этих элементов. Поэтому необходимо провести анализ и выполнить оценку жесткости элементов технологической системы. При этом будем рассматривать только радиальную (изгибную или объемную) жесткость, зависящую как от схемы наладки или набора (компоновки) элементов технологической системы, применяемого на данном переходе, так и от их конструктивно-геометрических параметров. Влияние контактной жесткости в виду специфики её действия и оценки, а также значительной величины, согласно данным [2], не учитываем, пренебрегаем также крутильной жесткостью, характерной только для инструментов малых размеров.

Оценку радиальной жесткости целесообразно проводить на основе общепринятого подхода, предложенного в работе [2]. В расчётах точности формообразования отверстий удобнее применять не радиальную жесткость J_i, а величину ей обратную – податливость W_i, которая для консольно закрепленного режущего инструмента в составе с оправками и державками имеет вид [2]

$$\frac{1}{J_i} = W_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(\sum\limits_{i=1}^{n} l_i \right)_3}{3EI_{i(xy)}},$$

где l_i – длина i-го элемента вспомогательного инструмента; $I_{i(xy)}$ – осевой момент инерции сечения i-го элемента ($I_i = 0,05d_i^4$ – здесь d_i – диаметр i-го сечения); n – число элементов; E – модуль продольной упругости ($E = 2,1 \cdot 10^2$ ГПа).

Наиболее простые схемы наладки включают спиральное (перовое) сверло или зенкер (развертка) насадной - оправка, установленные непосредственно в шпиндель станка. Для этих схем жесткость J определяется по формуле

$$\frac{1}{J} = \frac{l_u^3}{3EI_{(xy)}},$$

где l_u – длина вылета режущего инструмента или оправки; $I_{(xy)}$ – осевой момент инструмента или оправки по координатным осям X и Y.

Для повышения жесткости концевых мерных инструментов на универсальных станках, автоматических линиях и аналогичном оборудовании широко используются, направляющие элементы типа кондукторных плит, втулок и т. п. На станках с ЧПУ подобные элементы в настоящее время практически не применяются, так как считается, что они снижают гибкость, т. е. быстроту переналадки при обработке отверстий на станках с ЧПУ. Поэтому одним из требований при проектировании направляющих элементов для станков с ЧПУ является возможность быстрой переналадки [3].

Таким образом, при проектировании элементов технологической системы для повышения точности обработки отверстий на станках с ЧПУ необходимо обеспечить возможность направления режущего инструмента на этапе формообразования при условии быстрой переналадки. Создание направления для режущего инструмента позволит значительно увеличить жесткость режущего инструмента и соответственно уменьшить его упругие отжатия, повысив вследствие этого точность формообразования отверстий, особенно по расположению оси, а быстрая переналадка не существенно снизят гибкость обработки отверстий на станках с ЧПУ. Повышение производительности обработки отверстий, в которых заданы высокие требования к параметрам точности, возможно, при использовании концевых мерных инструментов с элементами для направления, за счёт уменьшения числа технологических переходов в многопереходной операции.

На рис. 1, а, б приведены расчётные схемы предлагаемых элементов технологической системы или инструментальные наладки для переднего направления режущего инструмента, а на рис. 2 – для заднего направления.

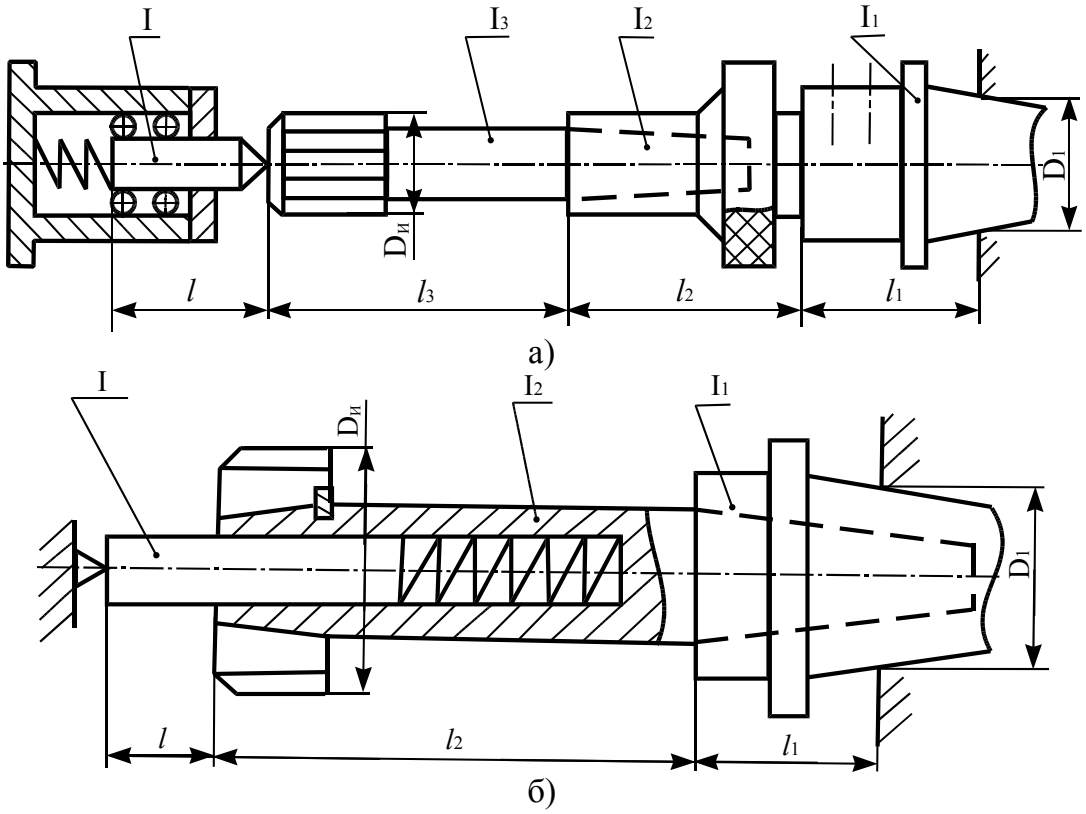


Рис. 1. Схемы инструментальных наладок с передним направлением: а – развертка (зенкер) многолезвийная, державка, втулка переходная регулируемая, поддерживающий центр; б – развертка (зенкер) насадная, переходная оправка, оправка с направлением

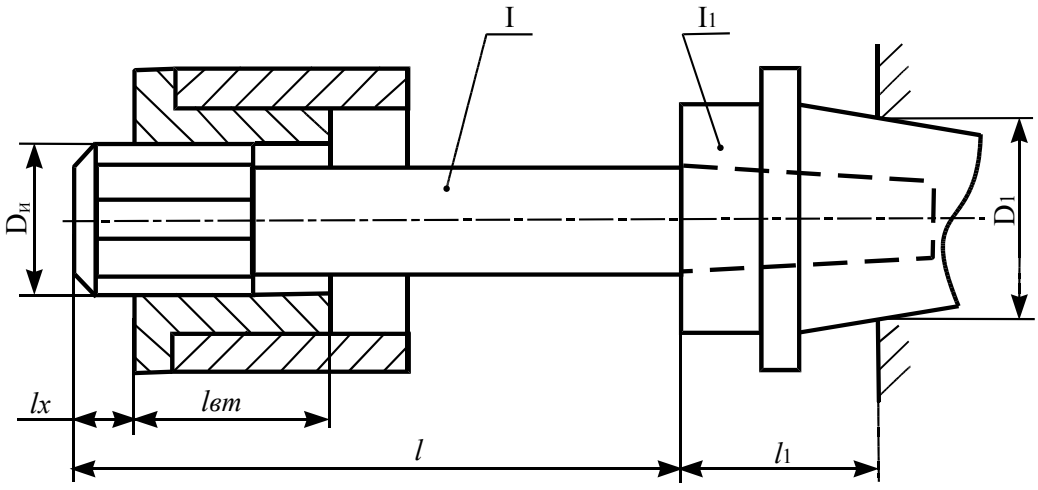


Рис. 2. Схема инструментальной наладки с задним направлением: развертка (зенкер) многолезвийная, переходная оправка, кондукторная насадка

Для схем наладок с передним направлением (см. рис. 1) инструмент имеет закрепление с двух сторон. Тогда жесткость, рассчитанная с учётом правила Верещагина [4], определится по следующей зависимости:

$$\frac{1}{J_{xy}} = \frac{1}{6E}\left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2 l^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} l_i + l\right)\left(\sum_{i=1}^{n} I_{i(xy)} + I_{(xy)}\right)}\right],$$

где l_i – вылеты режущего и вспомогательных инструментов; l – вылет направляющего элемента; $I_{i(xy)}$ – осевые моменты инерции режущего и вспомогательных инструментов; $I_{(xy)}$ – осевые моменты инерции направляющих элементов.

Для схемы наладки с задним направлением (см. рис. 2) при использовании кондукторной насадки, жесткость определяется в соответствии с [4] как

$$\frac{1}{J_{xy}} = \frac{1}{3E}\left[\frac{(3l + l_x) l_x^2}{4 \cdot I_{(xy)}} + \frac{(l + l_1)^3}{I_{1(xy)}}\right],$$

где l_x – вылет режущего инструмента за торец кондукторной втулки.

Таким образом, применение элементов технологической системы для переднего и заднего направлений на станках с ЧПУ и учёт их специфики через жесткость позволит более обоснованно прогнозировать точность этапа формообразования отверстий на станках, в том числе, станках с ЧПУ.

Библиографический список

1. Пестов, С.П. Система математических моделей формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ / С.П. Пестов, О.О. Беляев, П.Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2003. – № 4 (21). – С. 83–87.

2. Кузнецов, Ю.И. Оснастка для станков с ЧПУ: справ. / Ю.И. Кузнецов, А.Р. Маслов, А.Н. Байков. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

3. Пестов, С.П. Проектирование элементов технологической системы компьютеризованного оборудования для обеспечения высокой точности отверстий / С.П. Пестов // Образование и наука – производству: междунар. науч.-техн. и образоват. конф.: в 2 ч. – Набережные Челны: Изд-во Камской госуд. инж.-экон. акад., 2010. – Ч. 1, кн. 2. – С. 217–219.

4. Тарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В.Тарков, Г.С. Шпиро – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.

УДК 621.833 + 621.9:621.833

СПОСОБ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЗУБЬЕВ КОНИЧЕСКОЙ ШЕСТЕРНИ ЦИЛИНДРО-КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

С.В. Плотникова, Е.А. Полуэктов

При формообразовании рабочей поверхности зубьев шестерни цилиндро-конической передачи внутреннего зацепления возникает технологическая проблема получения теоретически точного профиля зубьев. В работе описан способ приближенного профилирования зубьев шестерни цилиндро-конической передачи инструментом реечного типа.

Ключевые слова: цилиндро-коническая передача, формообразование, зубья.

Цилиндро-конической передачей (ЦКП) называется передача, у которой одно из колес по форме заготовки коническое, а другое цилиндрическое [1]. Такие передачи могут передавать вращение на пересекающихся, скрещивающихся и параллельных осях. Компоновочные возможности ЦКП позволяют получать оригинальные конструкции зубчатых механизмов, обладающих рядом преимуществ по сравнению с другими зубчатыми механизмами.

Так, в частности, на кафедре «Техническая механика» филиала ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Златоусте разработаны оригинальные конструкции планетарных редукторов с ЦКП внутреннего зацепления. Достоинства конструкции (высокая нагрузочная способность, значительный ресурс работы, возможность выбора люфтов в зацеплениях, широкий диапазон передаточных чисел) предопределили использование данных редукторов в приводах космической техники вместо волновых передач [2, 3].

Однако широкое применение подобных конструкций ограничено особенностью изготовления конических шестерен передач внутреннего зацепления. Согласно второму способу Оливье, для обеспечения линейного контакта зубьев в ЦКП внутреннего зацепления и получения теоретически точной рабочей поверхности зубьев шестерен, производящим колесом в станочном зацеплении должно быть эвольвентное прямозубое колесо, идентичное цилиндрическому колесу передачи (рис. 1). Практически реализовать этот способ сложно из-за трудности изготовления долбяков с внутренними зубьями.

Схема внутреннего цилиндро-конического зацепления с эвольвентным цилиндрическим производящим колесом показана на рис. 2. Боковая поверхность зубьев колеса передачи (она же производящая поверхность) представляет собой эвольвентный цилиндр. Боковая поверхность зубьев

шестерни является огибающей производящей поверхности и будет неэвольвентной. Эта поверхность в подвижной системе координат $X_1Y_1W_1$, связанной с шестерней, описывается уравнениями:

$$X_1 = r_{b2}[\cos\varphi_1(\sin\alpha_{tw} - \nu_{y2}\cos\alpha_{tw}) -$$
$$-\sin\varphi_1\cos\Sigma(\cos\alpha_{tw} + \nu_{y2}\sin\alpha_{tw})] + u\sin\varphi_1\sin\Sigma;$$
$$Y_1 = r_{b2}[\sin\varphi_1(\sin\alpha_{tw} - \nu_{y2}\cos\alpha_{tw}) -$$
$$-\cos\varphi_1\cos\Sigma(\cos\alpha_{tw} + \nu_{y2}\sin\alpha_{tw})] - u\cos\varphi_1\sin\Sigma; \qquad (1)$$
$$W_1 = r_{b2}\sin\Sigma(\cos\alpha_{tw} + \nu_{y2}\sin\alpha_{tw}) + u\cos\Sigma;$$
$$\cos\alpha_{tw} = \cos(\nu_{y2} - \psi_{b2} + \varphi_1) = \frac{r_{b2}}{u\cdot\mathrm{tg}\,\delta_2};$$
$$\varphi_1 = \varphi_2\cdot i_{12},$$

где α_{tw} – угол зацепления в торцовом сечении колеса; ν_{y2} – угол развернутости эвольвенты; Σ – межосевой угол; u – аппликата торцового сечения колеса, $u = W_2$; ψ_{b2} – половина угловой толщины впадины зуба на основной окружности колеса; φ_1, φ_2 – углы поворота шестерни и колеса.

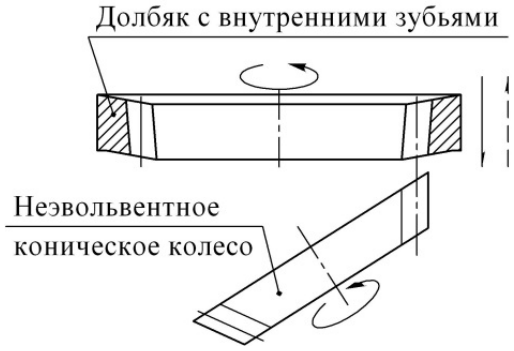


Рис. 1. Схема формирования зубьев долбяком

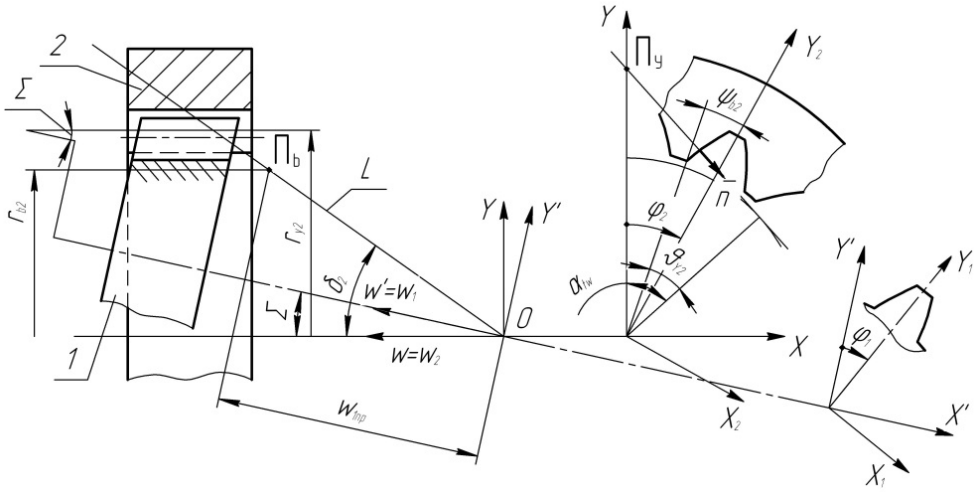


Рис. 2. Схема внутреннего цилиндро-конического зацепления

В работе [4] предложен способ формирования зубьев конической шестерни с помощью инструмента реечного типа (червячная фреза, круг, рис. 3) путем перемещения его по криволинейной траектории относительного оси нарезаемого колеса. Как показали исследования, подбирая соответствующую траекторию перемещения инструмента, можно получить зуб, близкий к теоретическому.

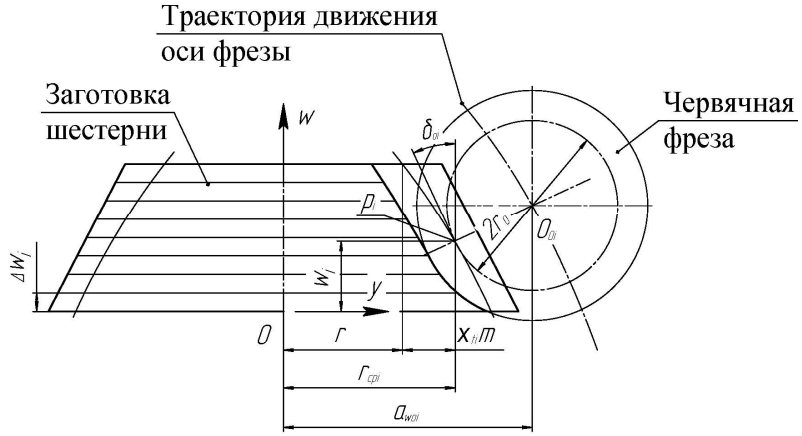


Рис. 3. Схема формирования зубьев червячной фрезой

Для расчета координат точек огибающей кривой использовался математический аппарат эвольвентно-конического зацепления [5], с учетом, что угол наклона инструмента δ_{0i} переменный в каждом сечении. Коэффициент смещения инструмента в произвольном торцовом сечении шестерни в середине высоты зуба определяется из выражения

$$x_{ti} = \left(\frac{s_{ti}}{2r_{cpi}} - \frac{\pi}{2z} - \operatorname{inv}\alpha_{ti} + \operatorname{inv}\alpha_{ty_{cpi}}\right)\frac{z}{2\operatorname{tg}\alpha_{ti}}, \qquad (2)$$

где s_{ti} – толщина зуба в середине высоты теоретически точного профиля; $\alpha_{ty_{cpi}}$ – торцовый угол на радиусе r_{cpi}; z – число зубьев нарезаемой шестерни; r_{cpi} – радиус шестерни, соответствующий середине высоты зуба.

Таким образом, нарезаемую шестерню можно представить как состоящую в осевом направлении из элементарных эвольвентно-конических колес одинакового торцового модуля m, но с разным торцовым углом зацепления α_{ti} и радиусом основной окружности r_{bi}, которые определяются из следующих выражений:

$$\operatorname{tg}\alpha_{ti} = \operatorname{tg}\alpha \cdot \cos\delta_{0i}, \qquad r_{bi} = r \cdot \cos\alpha_{ti}. \qquad (3)$$

Определив значение коэффициента смещения x_{ti} для разных торцовых сечений венца шестерни, путем аппроксимации получаем уравнение следующего вида:

$$x_{ti} = aw^2 + bw + c, \qquad (4)$$

где a, b, c – коэффициенты, которые получены при аппроксимации; w – аппликата торцового сечения шестерни.

Умножая это уравнение на модуль, получаем уравнение огибающей делительной поверхности инструмента

$$y = x_{ti} \cdot m = (aw^2 + bw + c)m. \quad (5)$$

Текущее значение угла δ_{0i} между касательной к кривой, описываемой уравнением (5), и осью y (см. рис. 3) определяем по формуле

$$\delta_{0i} = \text{arctg}(2aw_i + b). \quad (6)$$

Траектория движения оси фрезы – эквидистанта огибающей делительной поверхности инструмента. Расстояние между этими кривыми равно делительному радиусу фрезы r_0.

В предложенном способе нарезаемая поверхность зубьев шестерни получается приближенной к теоретически точной неэвольвентной поверхности описываемой уравнением (1).

Сравнительный анализ профилей показал, что максимальные отклонения для шестерни, как правило, не превышают сотые доли миллиметра. Однако в некоторых случаях отклонения профиля в крайних торцовых сечениях требуют продольной модификации [6, 7] зубьев.

Библиографический список

1. Давыдов, Я.С. Неэвольвентное зацепление / Я.С. Давыдов. – М.: Машгиз, 1950. – 180 с.

2. Создание нового поколения электромеханических приводов трансформируемых систем космических аппаратов: научно-технических сборник / В.П. Еремин, Н.В. Еремин, Б.А. Лопитин и др.; под ред. А.Н. Кирилина, В.П. Еремина. – Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦЧКБ-Прогресс», 2011. – 563 с.

3. Лопатин, Б.А. Цилиндро-конические зацепления в приводах машин / Б.А. Лопатин, О.Н. Цуканов, С.В. Плотникова // Вестник машиностроения. – 2003. – № 8 – С. 7–8

4. Пат. 2364480 С1 Российская Федерация, МПК В 23 5/24. Способ нарезания зубьев неэвольвентной шестерни цилиндро-конической передачи внутреннего зацепления / Б.А. Лопатин, Е.А. Полуэктов, Д.Б. Лопатин и др. – № 2008117944; заявл. 04.05.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23. – 2 с.

5. Безруков, В.И. Зубчатые передачи с эвольвентно-коническими колесами / В.И. Безруков // Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 254–261

6. Плотникова, С.В. Обеспечение требуемой точности профиля неэвольвентной шестерни продольной модификацией зубьев / С.В. Плотникова, Е.А. Полуэктов // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 1. – С. 292–294.

7. Полуэктов, Е.А. Модификация профилей зубьев в цилиндро-конической передаче внутреннего зацепления / Е.А. Полуэктов, С.Д. Лопатин // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 299–302.

УДК 621.311.1

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

С.Н. Трофимова, С.П. Максимов

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к работе систем электроснабжения городов, характерные отклонения от норм качества электрической энергии в системах электроснабжения города, предложены пути достижения требуемого уровня надёжности работы городских электрических сетей.

Ключевые слова: городские электрические сети, надежность, эффективность функционирования систем электроснабжения города, показатели качества электрической энергии, мультимодуль выбора фаз.

Увеличение количества городских жителей, развитие промышленности, создание совершенно новых по своей технологии производств, строительство новых и реконструкция действующих производственных объектов, внедрение мощных установок силового электрооборудования приводит к устойчивому росту электропотребления в городах, что требует систематического развития городских электрических сетей.

Городские электрические сети в современном городе, развивающемся быстрыми темпами, не всегда способны справляться с возрастающими электрическими нагрузками как на этапе передачи, так и на этапе распределения электрической энергии городским потребителям. Увеличение нагрузок в современном городе ведет к появлению определенных проблем в системах электроснабжения городского хозяйства. Увеличение потребления электрической энергии в свою очередь приводит к ужесточению требований к работе систем электроснабжения городов. Отключения в периоды пиковых нагрузок могут стать катастрофой для энергоснабжения городских потребителей, поэтому важное значение приобретают требования к качеству развития городских электрических сетей.

В настоящее время рост стоимости электроэнергии и ужесточение требований к качеству и надежности электроснабжения городского хозяйства придают изучению структуры и режимов функционирования систем электроснабжения города особую актуальность. Анализ нормативных документов по энергосбережению [1–3] позволяет выделить из множества факторов, характеризующих основные критерии оценки энергоэффективности, такой критерий, как уровень качества электроэнергии – отношение уровня ущерба, возникшего вследствие снижения качества электроэнергии в текущем отчётном периоде к предыдущему.

Особенности электроснабжения городов определяются массовостью всех сетевых многочисленностью электроприемников сравнительно небольшой мощности, разбросанных по всей территории города, влиянием условий городского хозяйства, разнотипностью оборудования, преобладанием электроприемников второй категории (по требованиям надежности электроснабжения) в жилых районах, отсутствием, как правило, постоянного дежурного персонала на распределительных пунктах и трансформаторных подстанциях [4, 5].

Рациональное построение и развитие системы электроснабжения городов основывается на таких специфических особенностях, как большая плотность электрических нагрузок, относительно равномерное распределение этих нагрузок на ограниченной территории, ограничение условий для выбора трасс линий, а также высокие требования к надёжности электроснабжения. Уровень надёжности работы городских электрических сетей определяется такими показателями, как вероятность отказа, или средний коэффициент вынужденного простоя, параметр потока отказов, среднее время восстановления элементов сети, а также относительное значение недоотпуска электроэнергии потребителям [6].

На современном уровне электроснабжения городов характерным является оптимизация развития существующей электрической сети, при которой необходимо исходить из общих принципов ее построения с учетом перспективы. При проектировании схем городских электрических сетей должна обеспечиваться экономичность их развития и функционирования, причем необходимо рассматривать работоспособность действующих сетей при перспективном уровне электрических нагрузок. Как схема, так и параметры городской электрической сети должны обеспечивать надежность электроснабжения, при которой в случае отключения любой линии трансформатора сохраняется питание потребителей без ограничения нагрузки с соблюдением нормативного качества электроэнергии. Показатели и нормы качества электроэнергии, в частности, относятся к таким составляющим, как частота, значение, форма напряжения и симметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения [7].

Для современных городских электрических сетей характерны колебания, провалы, недопустимые отклонения напряжения, а также несимметрия трехфазной системы. Причинам этого являются обрывы, отключения одной фазы, неравномерное распределение по фазам массовых однофазных электроприемников, характерных для городских потребителей, загрязнение изоляции городской средой, механические повреждения элементов сети, ошибочные действия оперативного и ремонтного персонала. При несимметричном режиме ухудшаются условия работы электроприемников и всех элементов электрической сети: снижаются экономичность и срок службы оборудования, уменьшается пропускная способность сети, увеличиваются потери энергии.

Достижение требуемого уровня надёжности и качества работы городских электрических сетей может быть достигнуто разработкой совершенных систем распределения электроэнергии, использованием рациональных конструкций распределительных устройств, выбором оптимальных значений сечений проводов и кабелей и т. п.

Обеспечение бесперебойного питания однофазных потребителей и защиту их от недопустимых колебаний напряжения в сети может обеспечить мультимодуль выбора фаз [8]. Выпускаемое отечественной промышленностью реле выбора фаз РВФ-1, которое представляет собой микропроцессорный однофазный блок автоматического ввода резерва, подключается, к трехфазной питающей сети и обеспечивает переключение однофазных потребителей на фазу питания, оптимальную по уровню напряжения, при колебаниях, недопустимых отклонениях или полных провалах напряжения «рабочей» фазы. В зависимости от наличия и качества напряжения на фазах устройство автоматически производит выбор наиболее благоприятной фазы и переключает питание однофазной нагрузки на нее. Но в таком случае нагрузка от одновременно работающих однофазных потребителей, включенных в локальную трехфазную цепь, (электросеть квартиры, жилого дома или организации), подключается к разным клеммам, но принадлежит одной, наиболее оптимальной фазе, способна уменьшить напряжение до порогового значения, а переключение на другую фазу при этом не даст существенных изменений, так как выбранная фаза может быть загружена аналогичными однофазными потребителями другого пользователя. Разделение же потребителей на конечное число независимых однофазных цепей потребует нескольких реле выбора фаз, что приведет к усложнению схемы и увеличению стоимости.

Кроме того, для реле РВФ-1 характерна задержка времени срабатывания, составляющая 0,1 секунды, вследствие которой происходит разрыв электрической цепи. При кратковременных нарушениях электроснабжения могут происходить сбои в работе электродвигательной нагрузки, компьютеров, электронных систем, в том числе работающих в режиме реального времени. В результате этого могут меть место сбои в системах управления, потеря информации и т. п.

Использование мультимодуля выбора фаз позволит подключить всех однофазных потребителей локальной трехфазной цепи к одному устройству, с возможностью бесперебойного выбора для них оптимальных фаз. Мультимодуль содержит заранее определенное количество выходов для подключения однофазных цепей потребления, которые связаны посредством микропроцессорного блока с тремя входными фазами. Этот микропроцессорный блок способен определять загруженность каждой фазы, с которой в каждый момент времени связана часть выходов мультимодуля. Имеющийся в мультимодуле микропроцессорный блок содержит логиче-

ское устройство с программно заданными порогами допустимых характеристик питающей сети и алгоритмом работы блока переключения, способное, перераспределять подключение каждого выхода любой из фаз таким образом, чтобы напряжение на каждой из фаз не превышало программно установленных пороговых значений.

Мультимодуль позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение городских потребителей с заданными показателями качества электроэнергии.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской федерации» № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. (в ред. от 08.05.2010 г. с изм. от 05.04.2013) // Информационно-справочная система «Гарант».

2. Распоряжение Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г. «Энергетическая стратегия России до 2030 года» // Информационно-справочная система «Гарант».

3. Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 г. «Концепция долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года» // Информационно-справочная система «Гарант».

4. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов / В.А. Андреев . – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.: ил.

5. Электротехнический справочник: в 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.

6. Трофимова, С.Н. Особенности развития городской электрической сети / С.Н. Трофимова / Наука ЮУрГУ: материалы 63-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ. – 2011. – Т. 3.

7. ГОСТ Р 54149–2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» ФГУП «Стандартинформ». – 2012.

8. Пат. 127539 Российская Федерация, МПК7 H02J3/00. Мультимодуль выбора фаз / С.П. Максимов, В.В. Ворона, А.И. Баукин. – № 2012119641/07; заявл. 12.05.12; опубл. 27.04.13, Бюл. № 12. – 1 с.

УДК 621.833

АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТРЕЗНОЙ МАШИНЫ «ВОЛЖАНКА-4»

Т.Р. Хазиев

Была проведена оценка коэффициента неравномерности вращения планетарных передач привода перемещения отрезной машины и коэффициент неравномерности вращения цепной передачи.

Ключевые слова: планетарная передача, цепная передача.

В современных тенденциях развития нефтепроводов наблюдается увеличение их пропускной способности, что приводит к росту давления в трубопроводе и как следствие увеличению толщин труб и использование высокопрочных материалов с пределом прочности свыше 60 кг/мм^2 (такие трубы используются на нефтепроводе «Восточная Сибирь – Тихий океан»). При строительстве и ремонте таких магистральных трубопроводов используются машины для безогневой резки труб большого диаметра (далее МРТ) [1, 2]. К конструкциям этих машин предъявляются достаточно жесткие требования: они должны быть высоконадежными, иметь минимальную стоимость, быть простыми в обслуживании, допускать эксплуатацию в сложных климатических условиях, обеспечивать резку труб в широком диапазоне диаметров. От надёжности и производительности МРТ существенно зависит время и стоимость ремонта трубопровода.

Существующие машины, как правило, имеют жёсткую кинематическую связь привода перемещения и главного движения (вращение инструмента), что не позволяет изменять режимы резания. Отсутствие регулирования режимов резания приводит к быстрому износу инструмента или к его поломке. Поломка инструмента приводит к возникновению ударных нагрузок и разрушению элементов машины, что существенно увеличивает стоимость и продолжительность ремонта трубопровода. В связи с этим в приводе подачи машины целесообразно применять независимый привод перемещения. На кафедре «Техническая механика» филиала ЮУрГУ в г. Златоусте предложена конструкция машины с независимым адаптивным приводом перемещения на базе широко используемой отрезной машины «Волжанка-3» . Применение такого привода перемещения машины позволит автоматически корректировать режимы резания с целью повышения стойкости инструмента и предохранения машины от перегрузок. При проектировании таких приводов одной из важных задач является оценка необходимой мощности резания и мощности на перемещение машины по трубе. Расчёт мощности резания рассчитывают по известным формулам теории резания [3]. Мощность необходимая для перемещения машины по

трубе зависит от условий закрепления машины, от её углового положения на трубе, от потерь на трение в узлах машины и мощности резания.

На рис. 1 представлена кинематическая схема предлагаемого электромеханического привода перемещения, которая содержит: вентильный двигатель ДВМ 100, две планетарные передачи типа 2К-Н, планетарную передачу типа 3К и ведущую звёздочку приводной цепи.

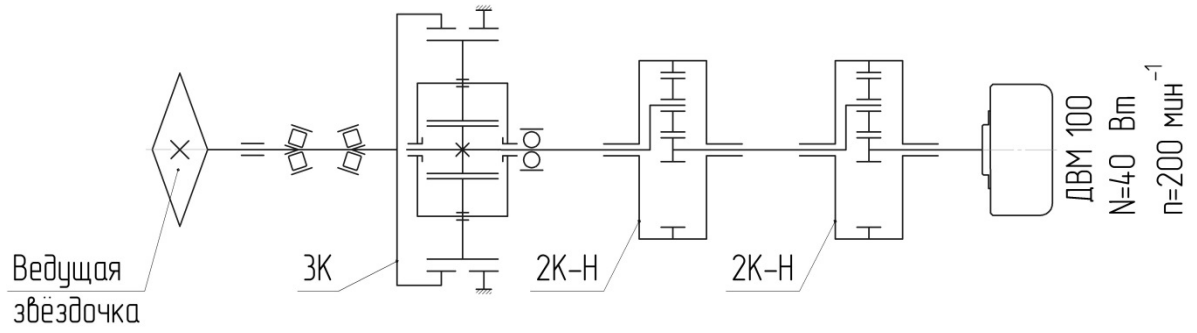


Рис. 1. Кинематическая схема привода перемещения

В связи с длинной кинематической схемой привода перемещения (это обусловлено передаточным отношением привода $i = 1926$) имеет место неравномерное вращение ведущей звёздочки приводной цепи. Поскольку, для стабилизации нагрузки действующей на машину, применяется адаптивная система управления необходимо учитывать неравномерность вращения в механических передачах, входящих в привод перемещения.

В связи с этим целью работы являлась оценка кинематических погрешностей многоступенчатой планетарной и цепной передач.

В ходе работы были решены следующие задачи:

- оценка неравномерности вращения планетарных передач;
- определение неравномерности вращения цепной передачи;

Неравномерность, создаваемая погрешностями в профиле зуба, практически не имеет значения, так как каждый зуб проходит через зацепление за незначительную часть оборота водила ($\approx 1/z$). Гораздо важнее неравномерность, создаваемая несовпадением центра основной окружности с осью колеса. В этом случае период изменения передаточного числа близок к периоду оборота водила. Как показано в работе проф. Л.Н. Решетова коэффициент неравномерности многократной передачи $\delta_П$ приближённо равен сумме коэффициентов неравномерности простых передач, в неё входящих [4]:

$$\delta_П = 2\left(\frac{e_1}{R_{01}} + \frac{e_2}{R_{02}} + \frac{e_3}{R_{03}} + \ldots + \frac{e_n}{R_n}\right), \quad (1)$$

где e_1, e_2, e_3 – эксцентриситет основной окружности первого, второго и третьего колеса соответственно; R_{01}, R_{02}, R_{03} – радиус основной окружности первого, второго и третьего колеса соответственно.

Учитывая степень точности (7-С по ГОСТ 1643–81) изготовления зубчатых колёс, по формуле (1) был рассчитан суммарный коэффициент неравномерности передач входящих в привод перемещения, значение которого составило: δ' = 0,12. При коэффициенте неравномерности δ > 2 будет иметь место периодическое вращение ведомого вала в обратную сторону [4]. В связи с неравномерным вращением ведомого вала приведённая к валу масса ведомой системы с моментом инерции J создаст на валу переменный инерционный момент M_J. Действие инерционного момента вызывает динамическую силу P_D. Для достижения минимальной неравномерности движения, снижения динамических нагрузок, повышения долговечности и надёжности планетарных передач необходимо обеспечить достаточную точность изготовления зубчатых колёс передач.

Рассмотрим неравномерность вращения цепной передачи (δ_3). Отличительной особенностью цепных передач является наличие кинематической неравномерности движения ведущей ветви цепи и ведомой звездочки, что обусловлено хордальным расположением звеньев цепи на зубьях звездочки [5]. Непостоянство угловой скорости ведомой звездочки характеризуется коэффициентом кинематической неравномерности вращения:

$$\delta_3 = 2\,\frac{\omega_2^{max} - \omega_2^{min}}{\omega_2^{max} + \omega_2^{min}}, \qquad (2)$$

где ω_2^{max} – максимальная угловая скорость ведущей звёздочки; ω_2^{min} – минимальная угловая скорость ведущей звёздочки.

На рис. 2 показаны скорости шарниров цепи и зубьев ведущей звездочки. В данный момент шарнир A находится в зацеплении, а шарнир B приближается к зацеплению с зубом C. Скорость шарнира A равна окружной скорости звездочки v в точке, совпадающей с центром шарнира. Эту скорость можно разложить на составляющие: v_2, направленную вдоль ветви цепи, и v_1 – перпендикулярно цепи. В зависимости от положения ведущего шарнира составляющие скорости изменяются:

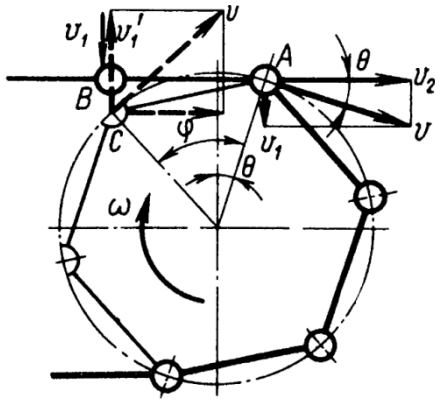


Рис. 2. Схема скоростей шарниров цепи

$$v_2 = v\cdot\cos\theta,\ v_1 = v\cdot\sin\theta \qquad (3)$$

Здесь значение угла θ изменяется в пределах $-\varphi/2 \le \theta \le +\varphi/2$. Угол $(-\varphi/2)$ соответствует моменту входа в зацепление шарнира A, угол $(+\varphi/2)$ – шарнира B, а $\varphi = \pi/z$.

По формуле (2) был рассчитан коэффициент неравномерности цепной передачи входящей в привод перемещения, значение которого составило: $\delta_3 = 0{,}042$.

Отрицательные кинематические и динамические свойства цепной передачи проявляются тем сильнее, чем меньше число зубьев ведущей звездочки. Кроме того при расчёте общей неравномерности перемещения машины необходимо учитывать неравномерность вызванная радиальным биением валов ($\delta_В$) привода, тогда общая неравномерность перемещения машины (δ_Σ) по трубе:

$$\delta_\Sigma = \delta_П + \delta_З + \delta_В. \quad (4)$$

Таким образом, полученное значение суммарного коэффициента неравномерности может быть учтено при расчёте и анализе мощности приводного двигателя.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель 44271 Российская Федерация, МПК В 23 D21/06. Устройство для резки труб / Общество с ограниченной ответственностью «Торгово-промышленная компания «Модуль». – № 2004106440; заявл. 09.03.2004; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7 – 3 с.

2. Патент на полезную модель 94497 Российская Федерация, МПК В 23 D21/06. Устройство для резки труб / Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «Редуктор». – № 2010104653/22; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15 – 3 с.

3. Косилова, А.Г. Справочник технолога машиностроителя: в 2 ч. / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1985. – Ч. 2 – 655 с.

4. Решетов, Л.Н. Об одном недостатке планетарных механизмов с большим передаточным отношением / Л.Н. Решетов // Вестник машиностроения. Серия «Конструирование, расчет, испытания, надежность машин». – 1957. – Вып. 1, № 5 (14). – С. 23–25.

5. Готовцев, А.А. Проектирование цепных передач / А.А. Готовцев, И.П. Котёнока. – 2-е изд. – М: Машиностроение, 1982. – 336 с.

УДК 621.744.6

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ ТЕРМОПАРЫ

А.В. Козлов, А.Е. Чумичёв

Приведены результаты измерения температуры при гибке труб с раскатыванием с использованием искусственной термопары. Выявлено влияние на температуру в зоне раскатывания изгибаемой трубы различных видов охлаждения раскатника. По результатам исследования предпочтительно использование смазочно-охлаждающих жидкостей на масляной основе.

Ключевые слова: гибка труб; раскатывание; температура; смазочно-охлаждающие жидкости.

Для рациональной компоновки трубопроводов и других изделий, изготавливаемых из труб, требуется большое количество их криволинейных участков. Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления криволинейных деталей трубопроводов. Однако в современных производственных условиях осуществить качественную гибку труб диаметром более 40 мм в холодном состоянии достаточно сложно. Связано это с тем, что она сопровождается такими нежелательными для последующей эксплуатации явлениями, как утонение стенки на внешней части гиба, сплющивание поперечного сечения, образование гофр и изломов на внутренней части гиба. Основным приемом снижения усилий гибки и повышения пластических свойств материала трубы является нагрев. Однако его применение требует значительных энергозатрат и использования сложного дорогостоящего оборудования.

Разработанная в ЮУрГУ технология гибки тонкостенных труб с раскатыванием устраняет многие из перечисленных выше недостатков. Сущность новой технологии гибки труб с раскатыванием [1] заключается в следующем. При вращении раскатника (рис. 1), заведенного в трубу с достаточно большим натягом, в каждой точке кольцевой зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб, при котором изгибные напряжения кратковременно достигают предела текучести σ_T. В результате при приложении относительно небольшого изгибающего усилия происходит гибка в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания.

Опыт показывает, что процесс гибки с раскатыванием (см. рис. 1) неразрывно связан с выделением тепла в зоне гиба. Причины его возникновения, характер распределения, а также процессы теплообмена между элементами технологической системы в зоне деформаций ещё недостаточно изучены [1].

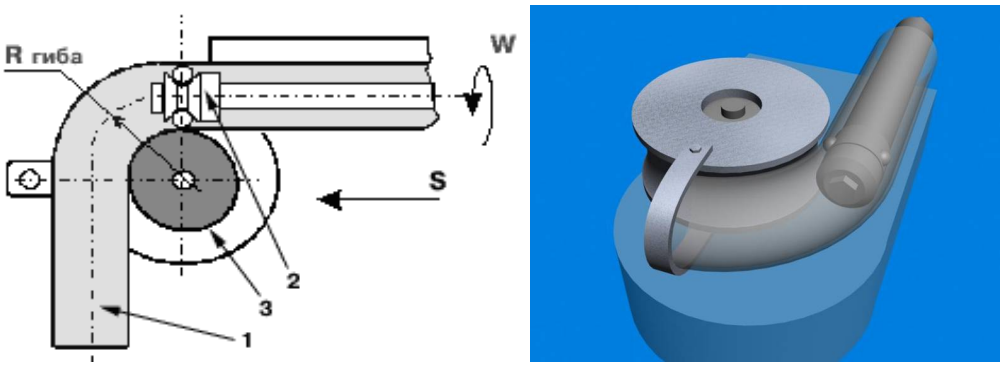


Рис. 1. Схема гибки труб с раскатыванием:
1 – труба, 2 – раскатной инструмент, 3 – гибочный ролик

Как известно, пластическое течение металла при гибке с раскатыванием представляет собой сдвиг одной части кристаллов вещества по отношению к другой, что является основной причиной выделения тепла в зоне гиба [2]. Весьма сложным является вопрос о его распределении. Неравномерность распределения тепла по сечению трубы обусловлена как различной интенсивностью деформаций в разных участках сечения, так и теплообменом с элементами оснастки станка (раскатным инструментом, роликом-шаблоном и т. д.). Каждый деформирующий элемент образует вокруг себя локальную зону нагрева с максимальной температурой для всего процесса гибки.

Проведенные исследования тепловых явлений показали, что под воздействием температуры протекают процессы определенного изменения свойств материала. В то же время вряд ли нагрев трубы до 200 °С существенно влияет на характер ее деформации, кроме случаев гибки труб из жаростойких и нержавеющих сталей. В этом случае важным является установление оптимального теплового режима, обеспечивающего наибольшую стойкость раскатного инструмента и правильный подбор режима охлаждения [3].

В связи с этим для определения температурных характеристик при гибе тонкостенных труб из нержавеющей стали была проведена серия экспериментов, в ходе которых замерялась температура в зонах раскатывания двумя искусственными термопарами (рис. 2). В процессе гиба зона раскатывания равномерно проходила точки 1–9 (рис. 3), расположенные вдоль трубы, и по мере их прохождения замерялась температура (см. таблицу). Для выявления влияния СОЖ на температурные характеристики процесса эксперимент проводился с тремя типами охлаждающих жидкостей: вода, эмульсия и масло. Результаты измерений приведены в таблице и на рис. 4, 5.

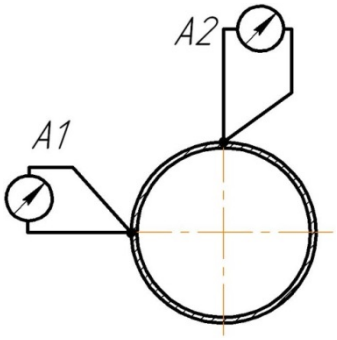


Рис. 2. Схема установки термопар

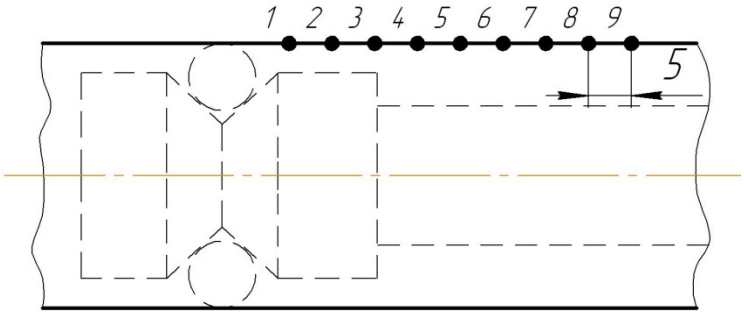


Рис. 3. Расположение точек измерения

Таблица

Результаты измерений

Размеры трубы $D \times H$, мм	Зона измерения	Вид охлаждения	Температура T, °С	Зона измерения	Вид охлаждения	Температура T, °С
∅20,5×1,25	A1	Вода	31 44 53 64 63 71 89 92 96	A2	Вода	33 38 43 52 63 74 81 97 101
		Эмульсия	57 61 63 66 70 76 83 87 93		Эмульсия	58 61 65 70 72 78 85 92 95
		Масло	36 37 38 40 47 52 60 66 71		Масло	36 36 40 42 44 48 53 60 63

Анализируя полученные результаты и сравнивая охлаждающее воздействие воды, эмульсии и масла на температуру гиба можно сделать следующие выводы. Масло действует наиболее эффективно, так как смазывает трущиеся поверхности трубы и раскатника, заметно уменьшая трение, но оно дороже и сложнее в использовании. Эмульсия обладает качествами, несколько уступающими маслу по смазывающему воздействию, но является более дешёвым средством. Вода, обеспечивая наилучший теплоотвод, практически не снижает трения в зоне контакта инструмента и детали. Следовательно, при гибке труб с раскатыванием желательно использовать смазочно-охлаждающие жидкости на масляной основе.

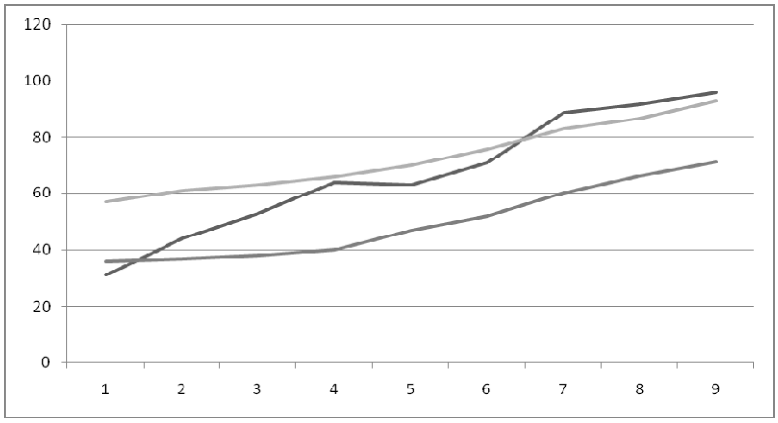


Рис. 4. График изменения температуры в зоне раскатывания (А1)

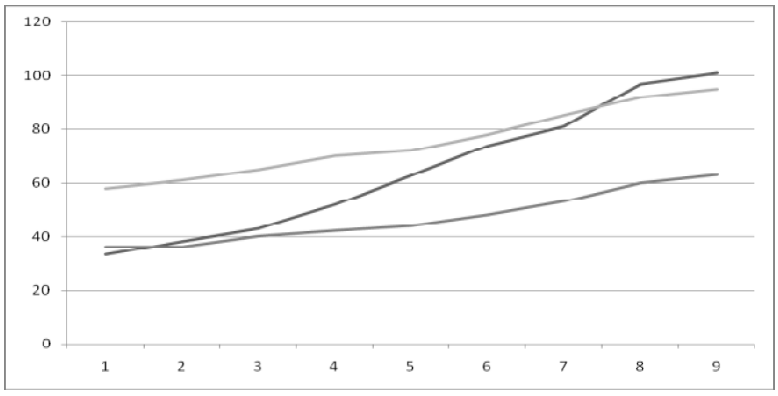


Рис. 5. График изменения температуры в зоне раскатывания (А2)

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: моногр. / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – 169 с.

2. Козлов, А.В. Изучение тепловых явлений при гибке труб с раскатыванием / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Рубцовск: Рубцовский технологический институт, 2000.

3. Козлов, А.В. Особенности холодной гибки труб из легированных сталей / А.В. Козлов, А.В. Бобылев // Вестник КГУ. Серия «Технические науки». – Курган: Изд-во КГУ, 2006. – Вып. 2, Ч. 1. – С. 190–192.

УДК 72,03(470,5)

К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УРАЛЬСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА

Л.В. Щетихина

Статья посвящена исследованию особенностей архитектуры Урала, проявившихся как в гражданском, так и в промышленном строительстве, своеобразии классицизма.

Ключевые слова: гражданское строительство, промышленное строительство, классицизм, ротондальные церкви.

В первой половине XIX века архитектура пыталась найти для инженерных конструкций и форм новые приёмы художественно-эстетической выразительности. Здесь наряду с твёрдо укоренившимися на Урале традициями рациональности архитектуры промышленных зданий наблюдались поиски декоративности, пластики. В целом, уральские зодчие по-прежнему, придерживались традиций русского классицизма, с присущим ему жёсткостью форм.

В уральских городах появились новые типы общественных зданий: вокзалы, биржи, банки, школы, лечебные сооружения.

В первой половине XIX века реконструкция заводов проводилась при активном участии архитекторов Горного ведомства. Их появлению на Урале способствовала реформа 1806 года об упорядочении заводского строительства, приведшая к учреждению должности архитектора горных заводов, горных округов и Главного правления горных заводов. Более 70 архитекторов внесли свой вклад в промышленное зодчество Урала. Наиболее крупными мастерами были И.И. Свиязев, А.З. Комаров, М.П. Малахов, В.Н. Петенкин, С.Е. Дудин, Ф.А. Тележников, крепостные архитекторы А.П. Чеботарев, К.А. Луценко, А.Д. Вяткин, Л.С. Мальцев и др. [1].

На центральной площади Златоуста в 1839 году завершилось строительство каменного здания оружейной фабрики по производству украшенного оружия. Оно строилось по проекту главного архитектора Уральского горного правления И.И. Свиязева и под наблюдением архитектора Златоустовских заводов Ф.А. Тележникова. Здание возводилось по инициативе П.П. Аносова на месте старых деревянных мастерских.

Здание оружейной фабрики в плане представляет собой каре. В связи с особенностями рельефа местности оно разноэтажное. С главного фасада, выходящего на площадь, оно двухэтажное, со стороны реки Ай трёхэтажное.

В состав архитектурного ансамбля центральной площади входит дом начальника горного округа, возведённый в первой четверти XIX века – кирпичный, двухэтажный, с мезонином. В центральной части над входом

был крытый балкон, не сохранившийся сейчас. За домом размещались огород, оранжерея, пруд с садом. Построили дом заводчики Лугинины вместо деревянного дома, сожжённого отрядом Е. Пугачёва. С 1811 года этот дом – резиденция для всех горных начальников. Исторический центр Златоуста был одним из лучших на Урале городских центров.

В мае 1836 года южнее площади произведена закладка Свято-Троицкого собора и колокольни (автор проектов Ф.А. Тележников), в которой принимали участие горный начальник П.П. Аносов, протоирей Улья Попов. Осенью 1840 года собор, рассчитанный на 3000 человек, был построен.

Композиция пятиглавого храма с одной стороны была украшена по фасаду выступающим притвором и шестиколонным портиком, с другой стороны – мощной апсидой. Главный купол собора имел восходящий силуэт за счёт поднятого центра.

Место для собора было выбрано очень удачно. Собор как бы замыкал собой городскую площадь. За ним простиралась гладь городского пруда. Таким образом, он воспринимался с любой точки во всём своём величии. Со всех сторон фоном ему были горы, поросшие лесами. Собор доминировал в окружающем пространстве.

Соборная колокольня была построена в 1843–1848 годы, которая в некотором смысле уникальна, прямых аналогий её нет. Главной её особенностью является многоярусность и подчёркнутая лёгкость самого сооружения. Нижний объём кубической формы, второй ярус с каждой стороны украшен портиками, с почти спаренными по краям колоннами и арочными проёмами. Третий ярус тоже украшен портиками, четвёртый ярус – квадратный, со срезанными углами, является переходным от кубических объёмов нижних ярусов к цилиндрическому завершающему [2].

При высоте в 70 м, колокольня не казалась тяжёлой и составляла контраст мощным формам собора.

Классицизм как господствующее течение русской архитектуры второй половины XVIII – первой половины XIX века распространился на Урале позднее, чем в Европейской России. Последние годы XVIII и первые годы XIX века являлись на Урале не столько переходными от барокко к классицизму (о таком переходе можно говорить только применительно к культовому строительству), сколько началом нового этапа, связанного с широким использованием камня во всех видах строительства и вместе с тем утверждения – самого широкого и повсеместного, в том числе и в деревянном строительстве, классицизма.

Промышленное и гражданское строительство Южного Урала взаимно обогатили друг друга в декоративной области. Черты, свойственные промышленному строительству, – рационализм, подчеркнутая монументальность, часто привносились в гражданские и культовые здания. И, наоборот, заводские постройки украшали формами, характерными для гражданской

архитектуры. В городах-заводах встречаются интересные примеры культовых сооружений зрелого классицизма. Выделяются ротондальные церкви – Введенская в Миньяре и Сретенская в Илеке.

Обе церкви были построены по проекту Е.Г. Малютина – известного русского зодчего М.Ф. Казакова.

Введенская церковь в Миньяре строилась из красного кирпича в низине, окруженной высокими горами, на «стрелке», месте слияния рек Миньяр и Сим, на самом берегу. Церковь имеет трехчастную продольно-осевую комбинацию и состоит из храмовой части – ротонды, трапезной и колокольни. Миньярскую церковь можно отнести к самым интересным памятникам русского классицизма.

В селе Илек находится еще одна красивая церковь, архитектура которой относится к типу храмов-ротонд. Примечательно, что единственным, кроме столиц, самостоятельным очагом культового ротондального строительства на всей территории России стал Урал.

Илекская церковь отличается расположением не на холме, а внизу, ближе к воде. Верхний ярус колокольни, завершенный сферическим куполом с главкой. Несмотря на то, что Сретенская церковь в Илеке несколько проще и сдержаннее столичных в своем декоративном убранстве, это, несомненно, памятник архитектуры с высокими художественными достоинствами.

Необычным элементом наследия стала базиликальная церковь с двумя колокольнями в Катав-Ивановске, которая была выполнена в соответствии с личными вкусами заказчиков (Белосельских-Белозерких).

Церковь Святого Иоанна Предтечи в Катав–Ивановске двухэтажная. В нижнем этаже престол во имя Святого. Иоанна Предтечи, а в верхнем – Казанской Богородицы. Миновало около двух столетий, а создание церкви в Катав-Ивановске продолжало оставаться загадкой. Дело в том, что этот храм напоминает польский костел, а не церковь. Есть очень близкая аналогия этому проекту – здание кафедрального собора в Люблине архитектора Антонио Корацци. Возможно, что этот проект был создан архитектором, происходившим из Люблина и сосланным на Урал.

Из-за удаленности региона стилевая архитектура прививалась постепенно, встречалось смешение классических и фольклорных элементов в декоре (раскрепованные плиты вместо капителей, горизонтальные пояски на стволах колонн, модильоны неклассических форм, ниши и наличники древнерусского рисунка, типичный уральский орнамент «ступенчатые сосульки» и т. д.).

Для южно-уральского классицизма характерно также упрощение рисунка ордерных элементов, например, профилей карнизов. С другой стороны, в оформлении традиционных жилищ наблюдались черты стилевой

архитектуры (своеобразные варианты пилястр, ленты орнамента «меандр»).

К необычности декоративных решений приводило, также, использование характерных местных материалов, особенно чугуна, из которого выполняли решетки, колонны и многие другие элементы. Преемственность материалов и декора в большой степени объяснялась артельным способом строительства того времени. На Южном Урале работали местные мастера, например, из Далматовского монастыря.

Помимо рассмотренных архитектурных сооружений, наиболее значительными памятниками рассматриваемого периода на Южном Урале следует признать:

• укрепленные линии и русские регулярные крепости этих линий;

• ансамбли центров городов-заводов Южного Урала: Кыштыма, Каслей, Катав-Ивановска и других, находящиеся в разной степени сохранности;

• этнические поселения нагайбаков и других народностей (Париж, Фершампенуаз и др.);

• Новолинейные крепости и станицы (Николаевская, Наследницкая, Берлин, Варна и др.);

Таким образом, в первой половине XIX века в архитектуре на Урале наблюдается тенденция классицизма с присущей ноткой своеобразия. Это качественный скачок в строительстве, да и жизни в этом регионе в целом.

Библиографический список

1. Пономаренко, Е. В. Архитектурно-градостроительное наследие Южного Урала: теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия / Е.В. Пономаренко. – М.: Центр, 2009. – 431 с.

2. Семенченко И.В. Культура Урала с древнейших времён до XX века: учеб. пособие / И.В. Семенченко, Л.В. Щетихина. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – 60 с.

ФИЛИАЛ В Г. КЫШТЫМЕ

УДК 621.396.96: 621.391.26

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ

А.Ю. Светлов

Предложены адаптивные алгоритмы обнаружения цели на фоне пассивной помехи, основанные на разложении корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи по собственным значениям и собственным векторам. Особенность алгоритмов заключается в варьировании числа каналов межпериодной обработки и обрабатываемых импульсов, что позволяет достичь компромисса между помехоустойчивостью алгоритма обнаружения и его вычислительными затратами.

Ключевые слова: РЛС; алгоритм обнаружения; пассивная помеха; адаптация.

В связи с повышенными требованиями по обеспечению безопасности полетов задача создания эффективных и практически реализуемых на современной элементной базе алгоритмов обнаружения радиолокационных целей на фоне пассивных помех, анализ их помехоустойчивости, является актуальной и требует дальнейших исследований в этом направлении.

В работе автора [1] задавался класс помех, к которому адаптировался алгоритм обнаружения:

$$K_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} \lambda_k \psi_{ki} \psi_{kj} g_i g_j^*, \qquad (1)$$

где $g_i = \exp(j2\pi f_c t_i)$ – множители поворота; N – число обрабатываемых импульсов; система ортонормированных векторов $\vec{\boldsymbol{\psi}}_{\mathbf{k}}$ выбрана заранее, а параметры λ_k и f_c – соответственно собственные числа корреляционной матрицы межпериодных флюктуаций помехи $\mathbf{K}$ и доплеровская частота помехи могут варьироваться.

Предложенный в [1] адаптивный к классу помех (1) алгоритм обнаружения для когерентно-импульсных РЛС имеет вид:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\hat{\lambda}_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \psi_{kj} \hat{g}_j^* x_j \right|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} C, \qquad (2)$$

где $x_j = \int_0^T x(t) s_0^*(t - t_j) dt$ – сигнал на выходе согласованного фильтра. Соответствующие оценки вычисляются с помощью двумерного скользящего окна «дальность-азимут» по формулам:

$$\hat{g_0 g_j^*} = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} x_0^l x_j^{l*}}{\left| \sum_{l=0}^{n-1} x_0^l x_j^{l*} \right|}, \quad \hat{\lambda}_k = (1/n) \sum_{l=0}^{n-1} \left| \sum_{j=0}^{N-1} x_j^l \psi_{kj} \hat{g_0 g_j^*} \right|^2,$$

где n – объем обучающей выборки.

Как отмечено в [1], помехоустойчивость алгоритма обнаружения (2) возрастает с числом обрабатываемых импульсов N, а его вычислительная сложность не зависит от объема обучающей выборки n, поскольку соответствующие оценки могут быть вычислены рекуррентно.

Увеличить помехоустойчивость представленного алгоритма обнаружения, и сохранить возможность обнаружения в режиме реального времени, как будет показано ниже, можно комбинацией числа обрабатываемых импульсов N и числа фильтров межпериодной обработки M. Для этого приведем алгоритм обнаружения (2) к следующему виду:

$$\sum_{i=0}^{N-1} |x_i|^2 - \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\hat{\lambda}_k - \hat{\lambda}_{\min}}{\hat{\lambda}_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \psi_{kj} \hat{g_j^*} x_j \right|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} C. \qquad (3)$$

Анализ собственных чисел λ_k, рассчитанных для разных значений ширины спектра помехи Δf (рис. 1) согласно [2], показывает, что только несколько собственных чисел (от двух до пяти) несут информацию о корреляционной функции помехи.

Это позволяет модифицировать алгоритм (3) таким образом, чтобы учитывать только наиболее значимые числа λ_k, сократив тем самым число операций:

$$\sum_{i=0}^{N-1} |x_i|^2 - \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\hat{\lambda}_k - \hat{\lambda}_{\min}}{\hat{\lambda}_k} \left| \sum_{j=0}^{N-1} \psi_{kj} \hat{g_j^*} x_j \right|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} C, \qquad (4)$$

где M – число информативных собственных чисел λ_k.

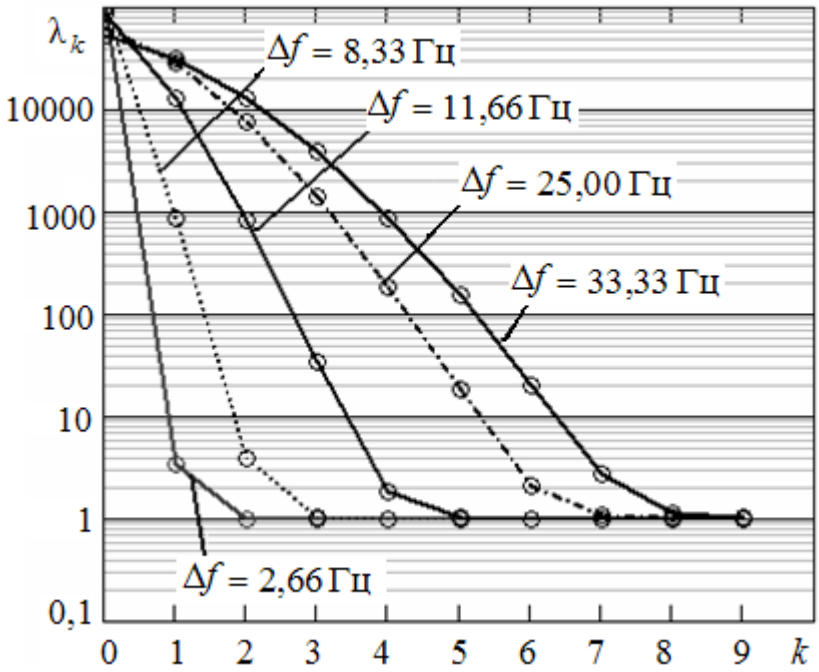


Рис. 1. Значения собственных чисел λ_k

Заметим, что основные вычислительные затраты алгоритмов обнаружения (2) и (4) определяются числом каналов межпериодной обработки; причем, у алгоритма обнаружения (4) по сравнению с алгоритмом обнаружения (2) эти затраты в N / M раз меньше.

Выясним, как влияет число каналов межпериодной обработки (M) на помехоустойчивость алгоритма обнаружения (4), воспользовавшись методикой расчета рабочих скоростных характеристик, приведенной в [1].

Расчет будем проводить при следующих постоянных и варьируемых параметрах. Постоянными параметрами при расчете являются: периоды повторения импульсов, равные 1808, 2196 и 2786 мкс; длина волны зондирующего сигнала, равная 0,24 м; отношение сигнал/шум по одному импульсу, равное 10 дБ; отношение помеха/сигнал, равное 30 дБ; вероятность ложной тревоги, равная 0,01 и доплеровское смещение частоты помехи f_c, равное 0 Гц. Варьируемыми параметрами при расчете будут являться ширина спектра флюктуаций помехи (Δf), число обрабатываемых импульсов (N) и число каналов межпериодной обработки (M).

Из расчетов следует, что уменьшение числа каналов обработки и сохранение помехоустойчивости алгоритма обнаружения (4) на предельном уровне возможно. Как видно на рис. 2, при числе обрабатываемых импульсов N, равном 10 и числе каналов обработки M, больше 7, алгоритмом обнаружения (4) достигаются предельные рабочие скоростные характеристики, рассчитанные для числа каналов обработки M, равном N.

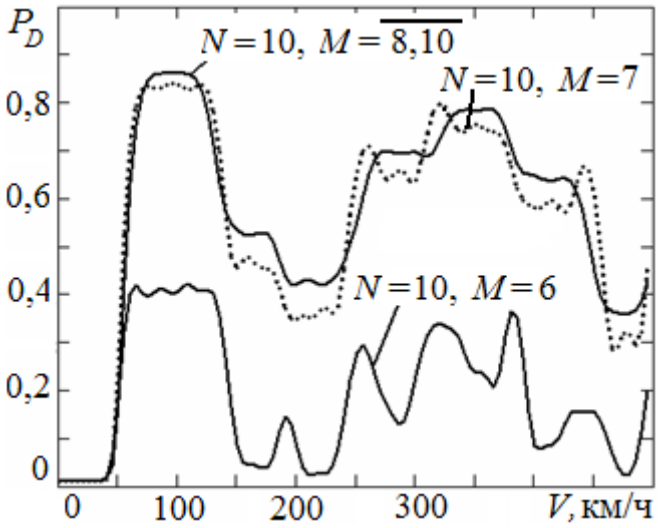


Рис. 2. Семейство РСХ ($\Delta f = 33{,}33$ Гц)

По результатам расчетов вычислительных затрат, связанных с реализацией алгоритма обнаружения (4) на практике, при числе каналов обработки M , равном 8, экономится 20 % вычислительных ресурсов.

Таким образом, варьируя число каналов обработки M и число обрабатываемых импульсов N алгоритма обнаружения (4), можно получить адаптивные алгоритмы обнаружения, с лучшим соотношением между помехоустойчивостью алгоритма обнаружения и его вычислительными затратами, чем при варьировании только числа обрабатываемых импульсов алгоритма обнаружения (2).

Библиографический список

1. Родионов, В.В. Алгоритмы адаптивного обнаружения движущихся радиолокационных целей на фоне пассивных помех / В.В. Родионов, А.Ю. Светлов // Радиотехника. – 2007. – №10. – С. 40–46.

2. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – Нью-Йорк, 1970.– Т. 3. – 327 с.

3. Радиолокационные устройства и системы: учеб. / под ред. А.С. Виницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 245 с.

УДК 621.92.06-529+621.825+621.824

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ ТИПА ВАЛ – МУФТА НА СТАНКАХ С ЧПУ В УСЛОВИЯХ ОАО «ВИШНЕВОГОРСКИЙ ГОК»

Н.Н. Суворова

В статье дается описание технологического процесса изготовления детали типа «вал-муфта» на ОАО Вишневагорский «ГОК» при условии проведения модернизации производства.

Ключевые слова: деталь; поверхность; операция; станок; оснастка.

Деталь «вал-муфта» (рис. 1) предназначена для передачи крутящего момента в механизме поворота трактора «Кировец 744Р».

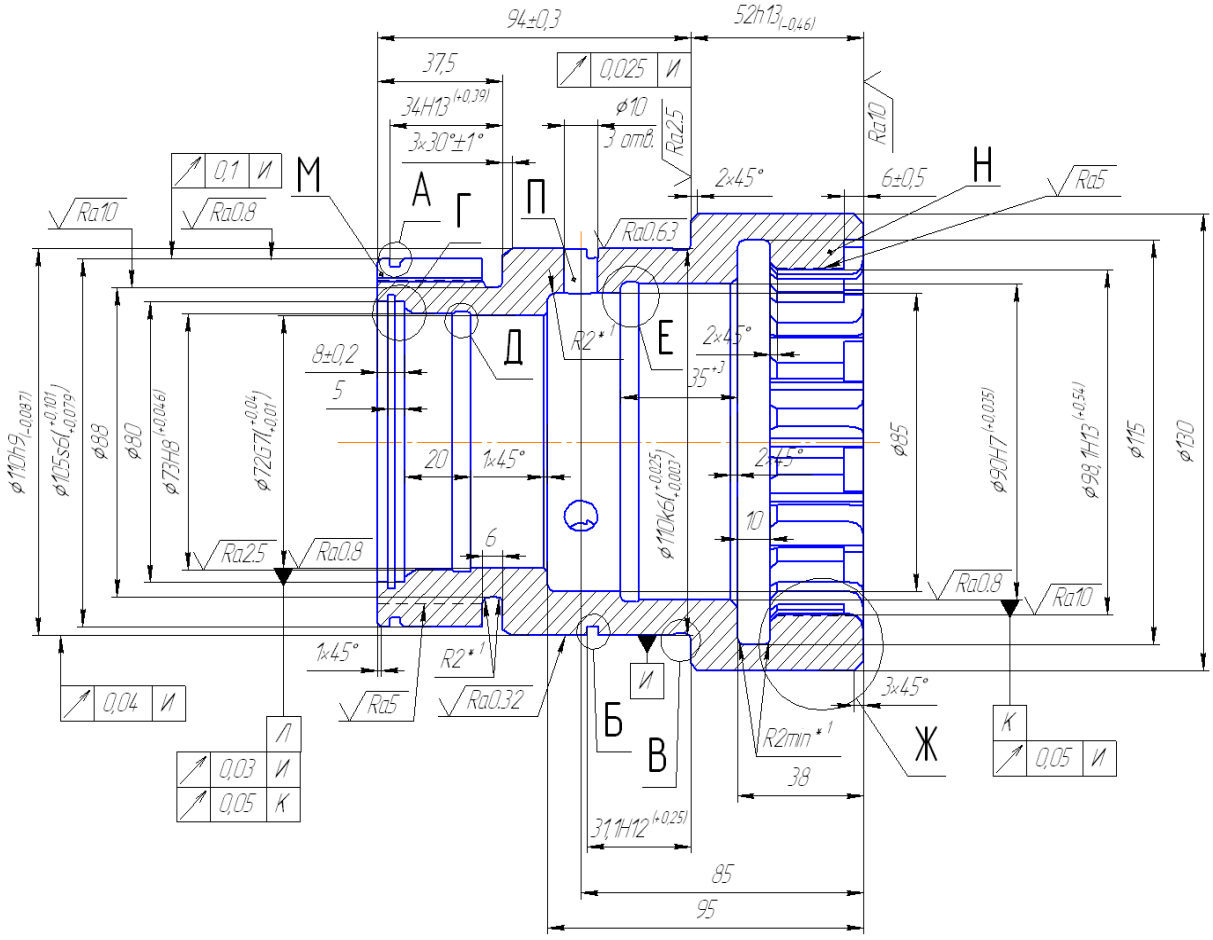


Рис. 1. Чертёж детали «вал-муфта»

Деталь представляет собой тело вращения со сквозным отверстием, имеет 2 зубчатых венца: один наружный с числом зубьев z = 23 и модулем m = 4мм, другой внутренний z = 22, m = 4,5 мм. На внутреннем венце пре-

дусмотрено зубозакругление и 11 выемок $\varnothing 20^{+2}$, глубиной 6 ± 0,5мм для лучшего зацепления с сопрягаемой деталью. За наружным зубчатым венцом имеется канавка шириной 6мм, за внутренним – выточка $\varnothing 115^{+0,87}$ и шириной 10 мм, которые предназначены для выхода зубообрабатывающих инструментов при обработке.

Для смазки внутренних поверхностей в конструкции предусмотрены три отверстия $\varnothing 10^{+0,36}$ мм, также имеются канавки для выхода режущего инструмента и установки уплотнительных колец.

Наиболее точными внутренними поверхностями являются поверхности $\varnothing 72^{+0,04}_{+0,01}$ и $\varnothing 90^{+0,035}$ с шероховатостью Ra 0,8, $\varnothing 73^{+0,046}$ с шероховатостью Ra 2,5.

Наиболее точными наружными поверхностями являются $Ø\ 110^{+0,025}_{+0,003}$ с шероховатостью Ra0,63 и $Ø\ 105^{+0,115}_{+0,090}$ с шероховатостью Ra 0,8.

Деталь изготавливается из конструкционной легированной стали марки 20ХГНР ГОСТ 4543–71, из которой, также, изготовляют зубчатые колеса, валы-шестерни, червяки, кулачковые муфты, втулки и другие ответственные детали, работающие в условиях высоких нагрузок и режиме интенсивного износа.

При оценке погрешностей форм поверхностей и их взаимного расположения, большое значение имеет наличие термической обработки в виде цементации, закалки и отпуска. При получении заготовки, необходимо учесть дополнительный припуск на обрабатываемые поверхности, связанный с короблением при нагреве и охлаждении детали.

При оценке технологичности положительным считается малые перепады диаметров и наличие канавок для выхода шлифовальных кругов.

При среднесерийном производстве, наиболее экономичным и целесообразным является получения заготовок путем штамповки на КГШП.

Одним из основных принципов построения технологических процессов является совмещение технических, экономических и организационных задач, решаемых в данных производственных условиях.

Выбор металлорежущего станка определяется: методом обработки; габаритными размерами заготовок с учетом их конфигурации; мощностью, необходимой на резание; техническими требованиями, определяющими точность и шероховатость обработанных поверхностей; производительностью и себестоимостью в соответствии с выбранным типом производства [1].

При выборе конкретной модели станка необходимо обязательно учитывать его технические характеристики, основные из которых размерные, скоростные и силовые.

Для токарной операции с ЧПУ выбираем токарный обрабатывающий центр Millturn M35G, который помимо основного шпинделя имеет контршпиндель, инструментальный магазин на 40 инструментов, а также нижнюю револьверную головку на 12 инструментов в дополнение к основному

резцедержателю. Эти элементы оснастки позволяют выполнять обработку заготовки с двух сторон одновременно на одной операции. Производительность в таком случае увеличивается на 100 %.

Для зубодолбежных операций выбираем зубодолбежные полуавтоматы 5М14, на которых можно производить обработку как наружных, так и внутренних зубчатых венцов. Для зубозакругляющей − зубозакругляющий полуавтомат 5Е580.

Для шлифовальных операций выбираем станки с ЧПУ, которые позволяют повысить производительность, путем обработки нескольких поверхностей без перенастройки станка. Внутришлифовальный станок с ЧПУ 3К227ВФ2, Торцекруглошлифовальный станок с ЧПУ 3Т160Ф2. Для обеспечения выполнения необходимых переходов выбор оснастки производим с учетом размеров заготовки, требований к точности и взаимному расположению поверхностей, типа производства.

Для токарной операции с ЧПУ оснастку выбираем фирмы Sandvik и Vertex, которые отвечают всем современным требованиям: два трёхкулачковых патрона с гидроприводом, девять базовых держателей С6-LC2060-00095, четыре базовых держателя С6-LC2060-53040, три резцовые головки С6-SCLCL-45065-12, четыре расточных оправки А40Т-SCLCL-12 .

Для зубообрабатывающих операций применяем трехкулачковый патрон, калибр-скоба $44{,}875^{-0{,}2}_{-0{,}35}$, зубодолбежное приспособление Т7522-4354, откидной упор специальный, калибр-скоба $49{,}42^{+0{,}8}_{+0{,}65}$, приспособление специальное Т7560-4109.

Для внутришлифовальной с ЧПУ применяем алмазный карандаш 3908-0055, калибр-пробка Ф72G7 АДЕ8140-0003, калибр-пробка Ф90Н7 АДЕ8140-0005, калибр-пробка Ф73Н8 АДЕ8143-0003.

Для торцекруглошлифовальной операции с ЧПУ разработаем оправку с гофрированными втулками. Для контроля размеров предусматриваем прибор активного контроля.

Режущий инструмент необходимо выбирать в зависимости от методов обработки, свойств обрабатываемого материала, требуемой точности обработки и качества поверхности по соответствующим стандартам и литературе [2].

Для токарной операции с ЧПУ для точения выбираем пластины фирмы Sandvik из каталога фирмы, для фрезерования и сверления – инструмент отечественного производства согласно ГОСТ 17025–71 и ГОСТ 10902–77 соответственно.

Для зубодолбежных операций долбяки выбираем по ГОСТ 9323–79, для зубозакругляющей в связи с требованиями к форме зуба выбираем специальную фрезу АК2578-4004.

Для шлифовальных операций с ЧПУ выбираем шлифовальные круги по ГОСТ Р 52781–2007.

При разработке технологических операций особое внимание уделяем выбору технологических баз для обеспечения точности обработки детали и выполнения технических требований чертежа. Выбор баз производится в соответствии с ГОСТ 21495–76. При этом соблюдаются основные правила базирования: правила шести точек, совмещения и постоянства баз.

Применение данного оборудования, инструмента и оснастки, может быть использовано при изготовлении деталей сходных по материалу, конфигурации и технологии изготовления.

Внедрение предлагаемого технологического процесса при техническом перевооружении предприятия позволит повысить производительность, снизить трудоемкость и себестоимость изготовления деталей.

Библиографический список

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 2. – 944 с.

2. Юрьев, В.Г. Приспособления для контроля точности деталей: учебник / В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2008г. – 346с.

ФИЛИАЛ В Г. МИАССЕ

УДК 624.131.4

УСТАНОВКА ИЗМЕРЕНИЯ ПУЧИНИСТОСТИ ГРУНТОВ

И.В. Войнов, Б.А. Морозов, Е.Н. Прокофьева

Спроектирована и изготовлена установка определения степени пучинистости грунтов. Показаны характеристики и особенности. Приведены фотографии установки.

Ключевые слова: степень пучинистости грунта, измерение.

Промерзание поверхностных слоев земной коры обусловливает объемное деформирование многих влажных дисперсных горных пород, почв и грунтов, выражающееся в увеличении объема и неравномерном поднятии их поверхности вследствие замерзания воды и образования ледяных включений. Процесс такого деформирования пород в строительной практике принято называть морозным пучением, а сами грунты, подвергающиеся пучению, пучинистыми или морозоопасными.

Необходимость учета и предупреждения воздействий промерзающих морозоопасных грунтов на фундаменты и конструкции зданий и сооружений, является одним из основных условий обеспечения устойчивости, эксплуатационной пригодности и долговечности сооружений, возводимых в районах сезонного промерзания грунтов.

Напряженно-деформированное состояние грунта при морозном пучении обусловливает недопустимые перемещения и серьезные повреждения промышленно-гражданских зданий, гидротехнических, мелиоративных сооружений, разрушение покрытий автомобильных дорог и аэродромов, искривление рельсошпальной решетки железнодорожной колеи, смещение опор мостов, линий электропередач, трубопроводов и других инженерных сооружений. Особенно широко деформации сооружений имеют место в районах глубокого сезонного промерзания грунтов, а также на территории с вечномерзлыми породами, где в условиях преимущественного распространения сильнопучинистых пылеватых грунтов воздействующие на сооружения силы пучения достигают значительных величин.

В дорожной практике морозное пучение грунтов приводит к образованию так называемых пучин, т. е. локальных взбугриваний земляного полотна, под которыми нередко понимают не только деформации грунтов при зимнем промерзании, но и потерю ими несущей способности

весной вследствие осадки и переувлажнения оттаивающего грунта – основания.

Недоучет морозного пучения грунтов в строительстве, а также несвоевременное назначение противопучинных мероприятий наносят огромный ущерб: снижают сроки и ухудшают условия эксплуатации сооружений, вызывают непроизводительные затраты труда, строительных материалов и финансовых средств.

Определить степень пучинистости почвы можно, обратившись к справочникам, где для каждого региона эти показатели уже посчитаны. Однако для получения точного результата необходимо на начальном этапе строительства изучить выбранный для этого участок [1].

Данные измерения производятся в соответствии с ГОСТ 28622–90 «Метод лабораторного определения степени пучинистости». Настоящий стандарт распространяется на пылевато-глинистые, крупнообломочные (с содержанием пылевато-глинистого заполнителя более 10 % общей массы), песчаные (с содержанием частиц мельче 0,05 мм более 2 % общей массы), биогенные и искусственные грунты и устанавливает метод лабораторного определения степени их пучинистости при исследованиях грунтов для строительства.

Для измерения степени пучинистости грунтов разработана и изготовлена многопостовая установка измерения степени пучинистости грунтов ИПГ-02МП, обеспечивающая:

- автоматическое поддержание температуры верхней термостабилизированной плиты, равной минус 4 ± 0,2 °С;
- автоматическое поддержание температуры нижней термостабилизированной плиты, равной 1±0,2 °С;
- измерение температуры нижнего торца образца грунта с погрешностью не более ±0,2 °С;
- возможность вертикального нагружения образца грунта с усилием до 300 Н;
- измерение вертикального усилия с погрешностью не более ±6 Н;
- измерение вертикальной деформации образца грунта с погрешностью не более ±0,01 мм;
- работу совместно с ПК в составе локальной сети. Количество пучиномеров в сети – не более 30.

Внешний вид собранного пучиномера приведен на рис. 1.

Термоконтейнер выполнен разборным, внешний вид разобранного термоконтейнера приведен на рис. 2.

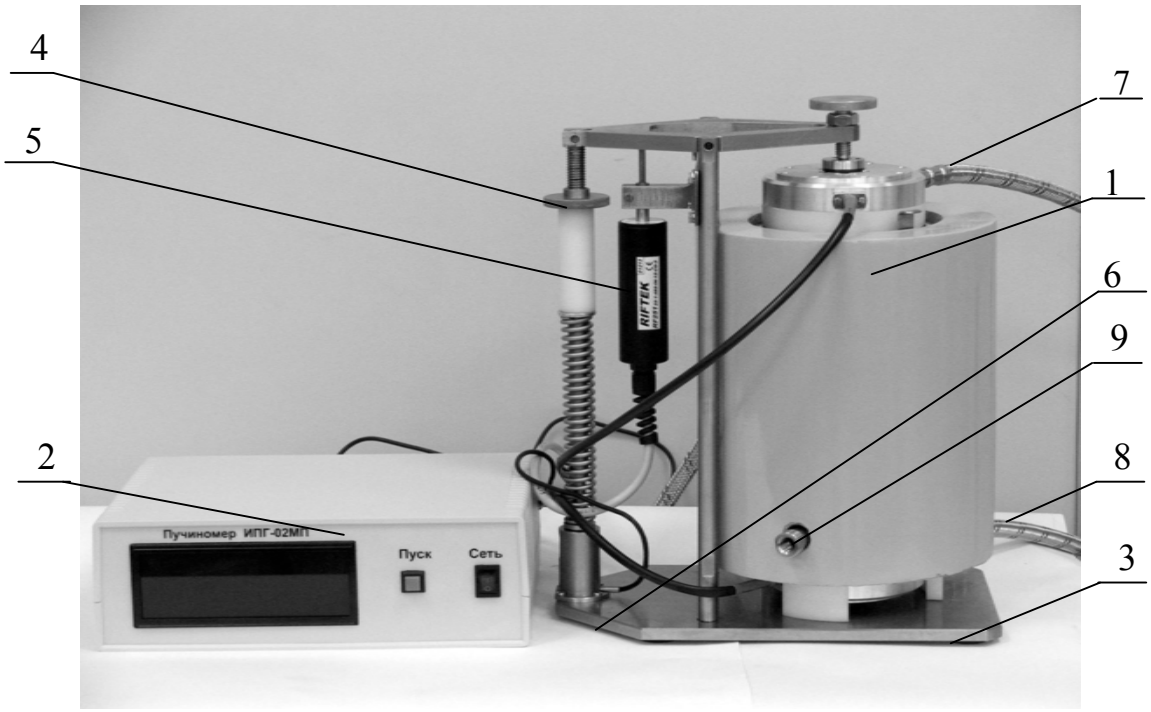


Рис. 1. Внешний вид собранной установки: 1 – термоконтейнер; 2 – электронный блок управления; 3 – основание; 4 – винт установки вертикального усилия; 5 – датчик линейного перемещения; 6 – датчик вертикального усилия; 7 – шланг подачи воды для охлаждения термоэлементов; 8 – шланг слива воды; 9 – штуцер подачи воды для смачивания капиллярно-пористого материала

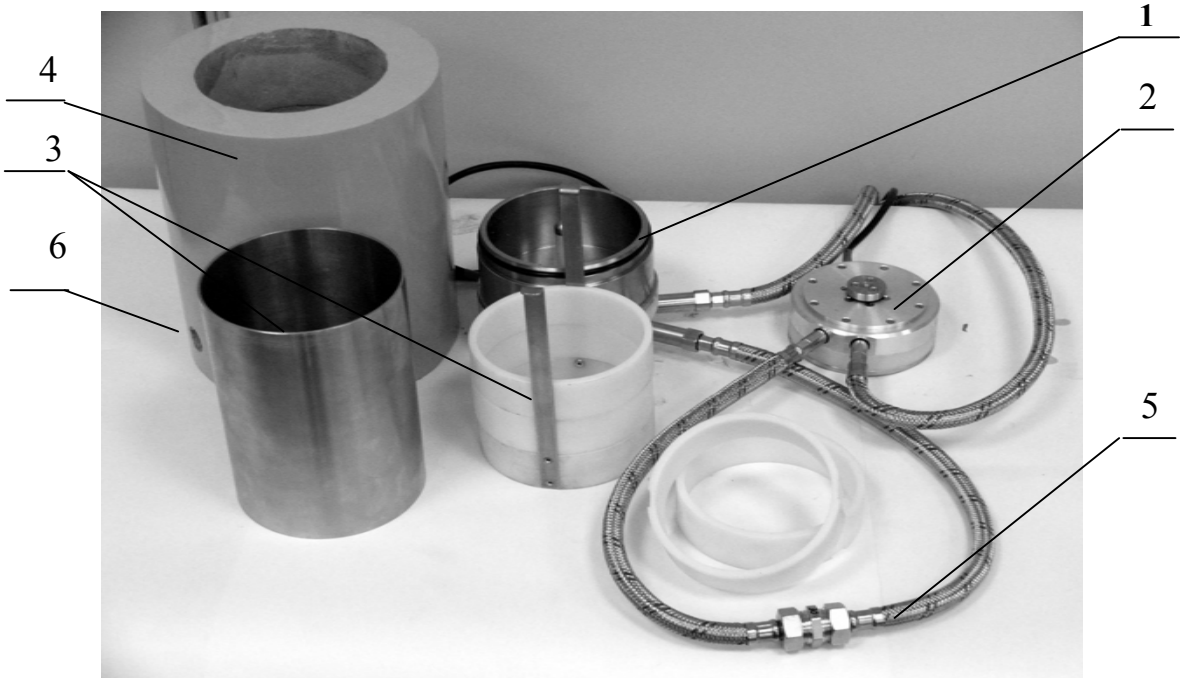


Рис. 2. Внешний вид разобранной установки: 1 – нижняя термоплита с датчиком температуры; 2 – верхняя термоплита; 3 – разборный стакан для образца грунта; 4 – термокожух; 5 – шланг для охлаждающей воды, соединяющий верхнюю и нижнюю термоплиты; 6 – отверстие в термокожухе для штуцера подачи воды

В процессе работы пучиномера происходит охлаждение нижней поверхности верхней термоплиты и внутренней поверхности основания с термоплитой. В каждой термоплите установлено по три датчика температуры. Для работы установки необходимо водяное охлаждение верхней и нижней термоплит проточной холодной водой. При этом подача воды должна осуществляться на верхнюю термоплиту, а слив воды – из нижней. Температура воды не должна превышать 25 °С.

После включения пучиномера происходит проверка правильности подключения кабелей и работоспособности всех датчиков температуры. После самопроверки система управления пучиномером предлагает выбрать режим работы: автономный или с управлением от ПК. Выбор режима осуществляется нажатием кнопки «Пуск». После выбора режима пучиномер переходит в режим начальной установки параметров. В этом режиме оператор по показанию на дисплее может в случае необходимости установить начальные показания датчика линейного перемещения и с помощью винта установить начальное усилие. Далее после нажатия кнопки «Пуск» пучиномер переходит в выбранный режим работы. В процессе работы происходит охлаждение верхней и нижней термоплит с использованием термоэлементов, использующих эффект Пельтье, и автоматически поддерживается требуемая температура.

В случае если выбран автономный режим работы начинается охлаждение верхней и нижней термоплит, происходит опрос датчиков перемещения и усилия. На индикаторе высвечиваются значения температур верхней и нижней термоплит, температура нижнего среза образца грунта и текущее значение усилия и линейного перемещения. Эта информация выводится непрерывно во время всего цикла испытаний.

В случае если выбран режим работы от ПК, компьютер периодически опрашивает значения с датчиков перемещения и усилия, запоминает их и может вывести на их график или таблицу. Регулирование температур верхней и нижней термоплит происходит автономно системой управления пучиномера. При необходимости к одному ПК может быть подключено до 30 одновременно работающих пучиномеров, что позволяет автоматизировать процесс испытаний и сократить время его проведения за счет одновременного испытания 3 образцов, как того требует ГОСТ «Метод лабораторного определения степени пучинистости».

Проведенные испытания показали полную работоспособность разработанного пучиномера и три образца переданы Заказчику для эксплуатации.

Библиографический список

1. Киселев, М.Ф. Предупреждение деформации грунтов от морозного пучения / М.Ф. Киселев. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 130 с.

УДК 531.383

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО ГИРОСКОПА ПРИ ВИБРАЦИИ ОСНОВАНИЯ

В.Б. Белугин, О.А. Мингалеев

Рассмотрено вибрационное воздействие на динамически настраиваемый гироскоп, которое обуславливает появление повышенной скорости ухода.

Ключевые слова: линейная вибрация, динамически настраиваемый гироскоп, собственная частота, скорость ухода.

Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) нашли широкое применение в мировой гироскопической технике в качестве чувствительных элементов инерциальных навигационных систем подвижных объектов гражданского и военного назначения [1]. Преимуществами ДНГ являются малые габариты и масса, высокая точность, надежность и механическая прочность.

Для расчета возмущающих моментов, приложенных к ротору ДНГ вследствие линейного вибрационного воздействия основания, необходимо оценить прежде всего частотные характеристики гироскопа в осевом (в направлении вектора кинетического момента) и радиальном (в плоскости, ортогональной вектору кинетического момента) направлениях. Для этого по аналогии с [2] представим вибромассовую модель ДНГ (рис.1) в каждом направлении как механическую колебательную систему с двумя последовательно соединенными массами – маховиком и приводным валом, при этом массами кардановых колец пренебрежем ввиду их малости по сравнению с массой маховика. На рис. 1 обозначены:

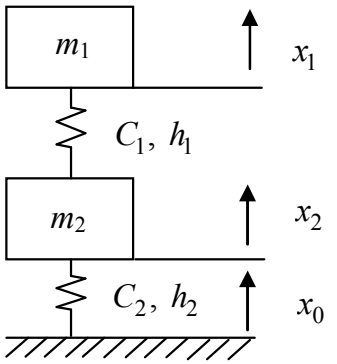


Рис. 1. Двухмассовая модель вибрационного движения ДНГ

C_1, C_2 – линейные жесткости подвеса маховика к валу и приводного вала к корпусу гироскопа;

h_1, h_2 – коэффициенты демпфирования маховика и приводного вала;

m_1, m_2 – массы маховика и приводного вала соответственно;

x_1, x_2 – обобщенные координаты движения маховика и приводного вала из положения равновесия;

x_0 – координата движения основания (корпуса) гироскопа.

Система уравнений, описывающих движение двухмассовой модели ДНГ [3] имеет вид:

$$m_1\ddot{x}_1 + h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + C_1(x_1 - x_2) = 0;$$
$$m_2\ddot{x}_2 + h_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + C_1(x_2 - x_1) + h_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_0) + C_2(x_2 - x_0) = 0. \quad (1)$$

С учетом $p = d/dt$ рассмотрим передаточные функции $W_1(p)$ и $W_2(p)$ [3], характеризующие движение ротора и вала относительно основания соответственно.

$$W_1(p) = \frac{x_1(p)}{x_0(p)} = \frac{D_1(p)}{D_0(p)} = \frac{(\tau_1 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)} \frac{(\tau_2 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}; \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{x_2(p)}{x_0(p)} = \frac{D_2(p)}{D_0(p)} = \frac{(T_3^2 p^2 + \tau_1 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)} \frac{(\tau_2 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \quad (3)$$

где

– периоды собственных колебаний

$$T_1 = E - T_2;$$

$$T_2 = 0{,}5E - [0{,}25E^2 - A^{1/2}]^{1/2},$$

$$E = [B + 2A^{1/2}]^{1/2}; \qquad A = \frac{m_1 m_2}{C_1 C_2}; \quad B = \frac{m_1 + m_2}{C_2} + \frac{m_1}{C_1};$$

– относительные коэффициенты демпфирования

$$\xi_1 = \frac{F - GT_1^2}{2T_1(T_2^2 - T_1^2)};$$

$$\xi_2 = \frac{GT_2^2 - F}{2T_2(T_2^2 - T_1^2)},$$

$$F = \frac{h_1 m_1 + h_2 m_1 + h_1 m_2}{C_1 C_2}; \; G = \frac{h_1}{C_1} + \frac{h_2}{C_2};$$

– собственные частоты системы $\Omega_j = 1/T_j$;

– постоянные времени $\tau_j = h_j / C_j$ ($j = 1{,}2$).

Подстановкой $p = j\omega$ в передаточные функции (2), (3) получаем соответствующие частотные передаточные функции (ЧПФ):

$$W_1(j\omega) = \frac{x_1(j\omega)}{x_0(j\omega)} = \frac{D_1(j\omega)}{D_0(j\omega)} = \frac{K + jL}{M + jN}; \quad (4)$$

$$W_2(j\omega) = \frac{x_2(j\omega)}{x_0(j\omega)} = \frac{D_2(j\omega)}{D_0(j\omega)} = \frac{R + jS}{M + jN}, \quad (5)$$

где ω – частота линейной вибрации основания;

$K = 1 - \tau_1\tau_2\omega^2$; $L = \omega(\tau_1 + \tau_2)$; $M = (1 - T_1^2\omega^2)(1 - T_2^2\omega^2) - 4\xi_1\xi_2 T_1 T_2 \omega^2$;

$N = (1 - T_2^2\omega^2)2\xi_1 T_1\omega + (1 - T_1^2\omega^2)2\xi_2 T_2\omega$; $R = (1 - T_3^2\omega^2) - \tau_1\tau_2\omega^2$;

$S = (1 - T_3^2\omega^2)\tau_2\omega + \tau_1\omega$.

Рассмотрим частотную передаточную функцию колебаний ротора относительно вала [3]:

$$W_{12}(j\omega)=\frac{x_1(j\omega)}{x_2(j\omega)}=\frac{KM+LN-RM-NS}{M^2+N^2}+j\frac{LM-KN-MS+RN}{M^2+N^2}. \qquad (6)$$

Из (6) получаем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) $A_{12}(\omega)$ и фазо-частотную характеристику (ФЧХ) $\psi_{12}(\omega)$ линейного движения ротора относительно вала [3]:

$$A_{12}(\omega)=\frac{[(KM+LN-RM-NS)^2+(LM-KN-MS+RN)^2]^{1/2}}{M^2+N^2}; \qquad (7)$$

$$\Psi_{12}(\omega)=\text{arc tg}\ \frac{LM-KN-MS+RN}{KM+LN-RM-NS}. \qquad (8)$$

Проанализируем поведение ДНГ при так называемой «косой» линейной вибрации с частотой ω. Вектор ускорения этой вибрации $\dot{\vec{W}}$ не совпадает ни с осевым, ни с радиальным направлениями. Составляющие этого вектора $\dot{\vec{W}}_{\text{О}}$, $\dot{\vec{W}}_{\text{Р}}$ направлены по оси кинетического момента и в плоскости вращения ротора соответственно. С учетом кинетического момента гироскопа H по аналогии с [2] угловая скорость ухода Λ при вибрации с частотой ω имеет вид:

$$\Lambda=M/H=\frac{0,25}{H}\,m_1^2\,\dot{W}_{\text{О}}\,\dot{W}_{\text{Р}}\left[\frac{A_{12}^{\text{О}}(\omega)\cos\psi_{12}^{\text{О}}}{C_1^{\text{О}}}-\frac{A_{12}^{\text{Р}}(\omega)\cos\psi_{12}^{\text{Р}}}{C_1^{\text{Р}}}\right], \qquad (9)$$

где $A_{12}^{\text{О}}$, $A_{12}^{\text{Р}}$ – значения АЧХ колебаний ротора относительно вала в осевом и радиальном направлениях соответственно;

$\dot{W}_{\text{О}}$, $\dot{W}_{\text{Р}}$ – амплитудные значения ускорения в осевом и радиальном направлениях;

$\psi_{12}^{\text{О}}$, $\psi_{12}^{\text{Р}}$ – значения фазы колебаний ротора относительно вала;

$C_1^{\text{О}}$, $C_1^{\text{Р}}$ – линейные жесткости подвеса маховика к валу гироскопа в осевом и радиальном направлениях соответственно.

Исходные данные для расчета скорости ухода:

$m_1 = 0{,}1$ кг; $m_2 = 0{,}06$ кг; $C_{1\text{О}} = 2{,}94\cdot10^6$ кг/с^2; $C_{1\text{Р}} = 2{,}94\cdot10^6$ кг/с^2;

$C_{2\text{О}} = 3{,}675\cdot10^6$ кг/с^2; $C_{2\text{Р}} = 9{,}8\cdot10^6$ кг/с^2; $h_1 = h_2 = 0{,}1$ кг/с.

Получены следующие параметры ДНГ:

– собственные частоты осевые: первая $\Omega_{1\text{О}} = 3791{,}34$ 1/с и вторая $\Omega_{2\text{О}} = 11192{,}663$ 1/с;

– собственные частоты радиальные: первая $\Omega_{1\text{Р}} = 4763{,}0745$ 1/с и вторая $\Omega_{2\text{Р}} = 14828{,}88$ 1/с;

– максимальные значения АЧХ на первой и второй собственных осевых частотах составляют 4841,8 и 1584,68 соответственно;

– максимальные значения АЧХ на первой и второй собственных радиальных частотах составляют 6484,67 и 3270,6 соответственно.

На рис. 2 приведена зависимость скорости ухода ДНГ от частоты ω в области первого осевого резонанса Ω_{1O}=3791,34 1/с при амплитудных значениях $\dot{W}_O = \dot{W}_P$=0,707 м/с^2, при этом амплитуда результирующей вибрации составляет 1 м/с^2.

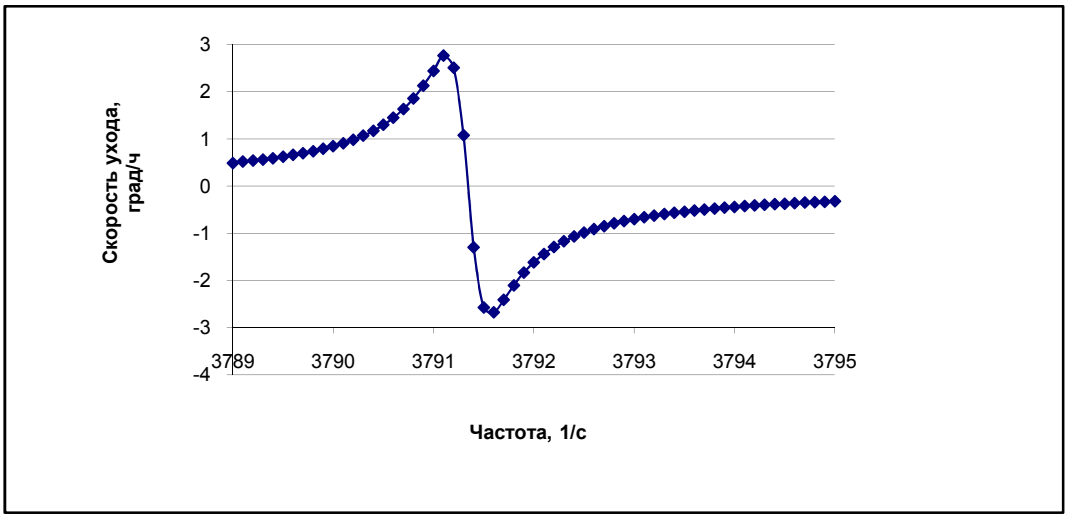


Рис. 2. Зависимость скорости ухода от частоты в области 1 осевого резонанса

Из рассмотрения зависимости скорости ухода по формуле (9) и рис. 2 следует:

– наибольшие значения скорости ухода обусловлены значительными амплитудами резонансов АЧХ в областях первых и вторых осевой Ω_{1O}, Ω_{2O} и радиальной Ω_{1P}, Ω_{2P} частот;

– при совпадении частоты вибрации ω с резонансными частотами Ω_{1O}, Ω_{1P}, Ω_{2O}, Ω_{2P} одно из слагаемых формулы (9) отсутствует, так как $\cos\psi_{12}^{O}$ или $\cos\psi_{12}^{P}$ равны нулю при $\psi_{12}^{O} = \psi_{12}^{P} = -90°$ или $-270°$, что приводит к уменьшению скорости ухода;

– в областях частот, близких к резонансным частотам (но не равных им) скорость ухода достигает максимальных величин.

Библиографический список

1. Новиков, Л.З. Механика динамически настраиваемых гироскопов / Л.З. Новиков, М.Ю. Шаталов. – М.: Наука, 1985.

2. Пат. №2235976 Российская Федерация. МПК[7] G 01 C 19/22. Динамически настраиваемый гироскоп / В.Д. Егоров, А.А. Тульчинский. – №2002107767; заявл. 26.03.2002; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

3. Белугин, В.Б. Анализ динамически настраиваемого гироскопа при линейных вибрациях / В.Б. Белугин, О.А. Мингалеев // Новые технологии: материалы VIII Всерос. конф.– М.: РАН, 2011. – С. 149–156.

УДК 681.121.8

МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

С.С. Голощапов

Приведен краткий обзор физических методов расходометрии. Рассмотрены основные принципы массовых расходомеров прямого действия.

Ключевые слова: массовый расход, ускорение Кориолиса.

Расход – это количество вещества, протекающее через данное сечение в единицу времени. Количество вещества измеряется или в единицах объема (литрах, кубических метрах), или в единицах массы (килограммах, тоннах). Соответственно расход измеряют в единицах объема, деленных на единицу времени (л/с, м^3/ч) или в единицах массы, также деленных на единицу времени (кг/с, т/ч). В первом случае имеем объемный расход $Q_{\text{о}} = dV/dt,$ во втором – массовый $Q_{\text{м}} = dM/dt$. Прибор, измеряющий расход вещества, называется расходомером.

Расходомер, снабженный интегратором, позволяет получить объем V или массу M вещества, прошедшего через него:

$V = \int_0^t Q_{\text{о}}\, dt,$ или $M = \int_0^t Q_{\text{м}} dt.$

Такой прибор называются счетчиком количества или просто счетчиком (ГОСТ 15528–86).

Расход является одним из важнейших параметров в промышленности. Измерение расхода по частоте применения составляет около 25 % всех промышленных измерений. Если сравнить относительный объем продаж на мировом рынке приборов для измерения параметров сред, то окажется, что для расходомеров он составляет около 40 %.

В промышленности для целей технологического учета и контроля применяются, главным образом, расходомеры с сужающими устройствами, преобразующие расход в перепад давления. Такие расходомеры не требуют проливки для метрологической поверки, однако характеризуются весьма малым диапазоном измерения.

Возросшие требования к коммерческому учету материальных и энергетических ресурсов обусловили создание и применение множества расходомеров различных видов [1].

Большое применение нашли электромагнитные расходомеры, имеющие линейную шкалу в широком диапазоне измерений, малое гидравлическое сопротивление. Их показания не зависят от параметров среды (вязкость, плотность, химический и фазовый состав).

Сравнительно недавно появились и уже нашли широкое распространение вихревые расходомеры с обтекаемым телом, достоинством которых

является хорошая точность, частотный выходной сигнал, безпроливочная поверка, относительно низкая стоимость. К недостаткам следует отнести то, что для устойчивого вихреобразования требуются достаточно высокие скорости потока, что вызывает значительную потерю давления.

Ультразвуковые расходомеры, использующие перемещение колебаний движущейся средой, применяются для измерения расхода гомогенных жидкостей без ограничения сверху на диаметр трубопровода. Такие расходомеры могут выполняться накладными, что позволяет производить измерения расхода без врезки в трубопровод.

Заметим, что рассмотренные расходомеры измеряют объемный расход. Для того чтобы получить соответствующий массовый расход, необходимо оценить плотность вещества, то есть массу, заключенную в единице объема $\rho = m/V$. Плотность вещества, является функцией температуры и давления. Обычно эта функция определяется экспериментально и выражается в виде таблицы или формулы. Для жидких веществ изменение объема ΔV при изменении давления ΔP весьма мало и определяется коэффициентом сжимаемости β:

$$\Delta V = -\beta V_0 \Delta P,$$

где V_0 – начальный объем.

Так, например, для воды $\beta \approx 5 \cdot 10^{-10}$ 1/Па. При увеличении давления на 10^6 Па (≈ 10 атм) относительное приращение объема составит

$$\Delta V/V_0 = -\beta \Delta P = -5 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6 = -5 \cdot 10^{-4} = -0{,}05\ \%.$$

Зависимость плотности жидкости от температуры более существенна. Плотность воды при температуре 0 °С максимальна и имеет значение 103 кг/м^3. При температуре 90 °С плотность уменьшается до 965 кг/м^3. При небольших вариациях температуры (водоснабжение) ее влияние на плотность обычно не учитывается. В системах отопления температура теплоносителя изменяется в значительных пределах и для учета ее влияния системы коммерческого учета тепловой энергии (теплосчетчики) как правило, снабжаются датчиками температуры.

Для газов, в первом приближении, плотность пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре. Для оценки плотности необходимо применение соответствующих датчиков. Однако это допустимо лишь для однородных однофазных потоков.

В системах автоматического регулирования теплоэнергетических установок, в ракетной и авиационной технике, в различных химических процессах массовый расход $Q_м$ является основным физическим параметром, определяющим оптимальные режимы работы объектов и качество процессов. В связи с этим в последнее время разрабатываются и внедряются различные приборы для измерения массового расхода [2].

Несмотря на многообразие предложенных принципиальных схем и конструктивных решений, массовые расходомеры прямого действия можно отнести к двум основным видам: силовым и тепловым. Принцип дейст-

вия силовых расходомеров основан на том, что потоку измеряемого вещества сообщается дополнительное движение, чтобы создать в потоке инерционные эффекты, по которым судят о значении массового расхода.

На рис. 1 изображена принципиальная схема вибрационного кориолисового преобразователя расхода. Измеряемое вещество поступает по трубе 1, закрепленной в корпусе 2. Труба 3 связана гибким соединением с трубой 1. Это позволяет ей совершать колебательное движение под действием электромагнитной катушки возбуждения 4. При этом в потоке возникает кориолисово ускорение и соответствующая сила. Если ток возбуждения постоянный, то о массовом расходе можно судить по размаху колебаний φ, который уменьшается с его увеличением. Если поддерживать амплитуду колебания постоянной, расход можно оценивать по силе тока возбуждения.

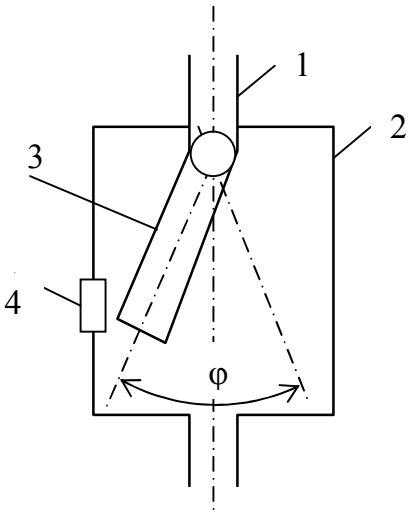


Рис. 1

Частный случай кориолисового расходомера – гироскопический расходомер, в котором преобразователь состоит из участка трубы в виде петли, которая вращается с постоянной угловой скоростью.

Турбосиловыми называют силовые расходомеры, в преобразователе которых поток закручивается электроприводом, либо пассивными крыльчатками, установленными в потоке. На рис. 2 изображен расходомер, состоящий из двух крыльчаток 1 и 2, связанных между собой пружиной 3. Углы наклона лопастей у крыльчаток разные. Это вызывает при движении потока закручивание пружины на угол, пропорциональный массовому расходу и появлению фазового сдвига на выходе тахометрических преобразователей 4 и 5.

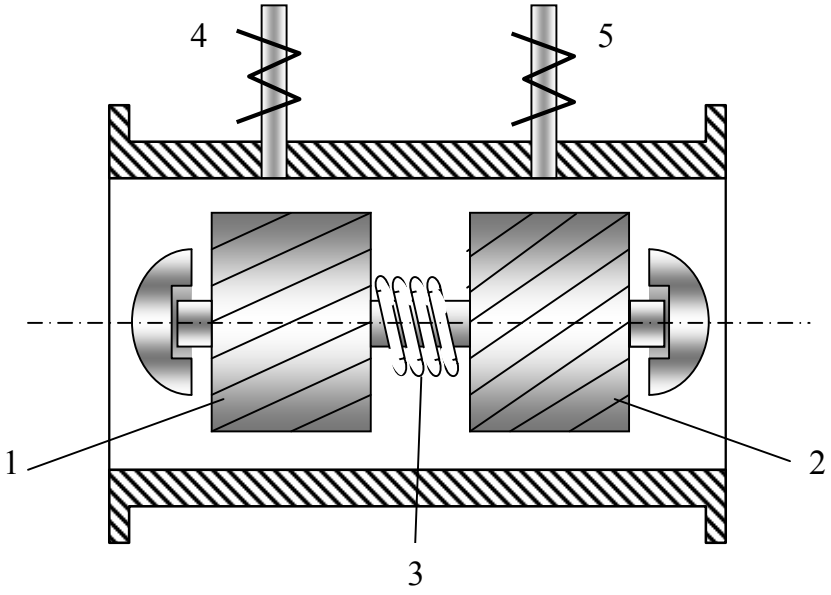


Рис. 2

Принцип действия тепловых расходомеров основан на непрерывном нагреве потока (калориметрические расходомеры) или специального элемента, помещенного в поток (термоанемометры).

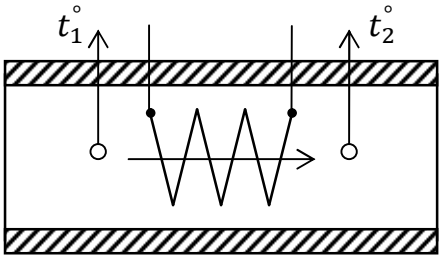


Рис. 3

У калориметрических расходомеров измеряется разность температур газа или жидкости при постоянной мощности нагрева или же мощность при постоянной разности температур (рис. 3). У термоанемометров измеряется сопротивление нагреваемого тела при постоянной силе тока или же сила тока при постоянном сопротивлении.

Отметим основные свойства и области применения массовых расходомеров.

Кориолисовые расходомеры (в том числе и гироскопические) отличаются высокой точностью измерений (до 0,05 % по массе), большим диапазоном измерений. При их монтаже не требуются прямолинейные участки трубопровода до и после расходомера. Основным достоинством данных расходомеров является возможность их применения для измерения расхода многофазных сред. Так, например, эти расходомеры используются для измерения расхода нефтегазовых смесей [3].

Турбосиловые расходомеры отличаются большей компактностью. Для средних и больших расходов турбосиловые расходомеры являются единственно применяемыми из всей группы силовых расходомеров. Максимальные расходы жидкости у них составляют 6–300 т/ч при диаметрах труб 50–200 мм. Их погрешность ±(0,5–2) % от предела шкалы. Общий недостаток силовых расходомеров – сложность конструкции, высокая стоимость.

К достоинствам термоанемометров относятся большой диапазон измеряемых скоростей, начиная от весьма малых, и высокое быстродействие, позволяющее измерять скорости, изменяющиеся с частотой до килогерц.

Тепловые расходомеры могут применяться при измерении небольших расходов практически любых сред с неизменными теплофизическими свойствами, в том числе для измерения расхода очень вязких материалов.

Библиографический список

1. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справ. / П.П. Кремлевский – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701 с.
2. http://www.rotametr.ru/
3. http://vpu-05.ru/

УДК 621.311.25

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РОЛЬ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Н.И. Смоленцев

Предлагается классификация локальных электрических сетей для независимого электроснабжения потребителей. Обосновывается роль накопителя энергии в ЛЭС, приводится пример классификации локальных электрических сетей.

Ключевые слова: локальная электрическая сеть, накопитель энергии, альтернативный источник электроэнергии, интеллектуальная система управления.

В настоящее время все более широкое применение находят системы энергоснабжения с использованием солнечной энергии, энергии ветра, биогаза и других возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1–6]. Использование таких источников энергии отвечает социальным и экологическим требованиям, способствует снижению ее себестоимости. Как правило, возобновляемые источники электрической энергии работают в составе автономных сетей, получивших название локальных электрических сетей (ЛЭС). Состав и структура ЛЭС становятся все более разнообразными и зависят от региона страны, назначения ЛЭС и вида ВИЭ. Следовательно, локальные электрические сети для различных российских регионов, отличающихся потенциалом ВИЭ, существенно будут отличаться по своему составу, нагрузкам, виду источника энергии, мощности и другим важнейшим технико-экономическим характеристикам.

В связи с этим встает вопрос о необходимости разработки системы классификации и оптимизации структуры ЛЭС и ее элементов на основе системного подхода с учетом географического, энергетического, экологического и социального аспектов их применения.

Основная цель разработки ЛЭС с возобновляемыми источниками энергии – это энергосбережение и повышение энергетической эффективности использования электроэнергии в регионах, при этом, необходимо добиваться максимального масштабирования и унификации типовых технических решений. При этих условиях «электрофикация» страны за счет ЛЭС будет общедоступна потребителю с учетом особенностей конкретного региона. В какой-то степени системный подход к проблеме разработки ЛЭС широкого применения позволит выработать общие стандарты, аналогичные стандартам коммуникационных сетей в Интернете.

Целью настоящей работы является обоснование необходимости системного подхода к анализу локальных электрических сетей с ВИЭ с целью с целью унификации и стандартизации разработок и выработки общих направлений классификации. Это позволит значительно ускорить внедрение альтернативной энергетики в экономику регионов и, соответственно, всей страны. Более того классификация необходима для анализа основных технико-экономических показателей ЛЭС различного типа и их сравнения с целью принятия аргументированного технико-экономического решения.

Современная локальная электрическая сеть содержит, как правило, следующие основные элементы:

– источник альтернативной электроэнергии;

– накопитель электрической энергии;

– блок преобразования и управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии:

– систему интеллектуального управления.

Классификацию ЛЭС может быть произведена, например, по типу возобновляемого источника электрической энергии. Это ЛЭС на основе солнечных фотоэлектрических устройств, водородно-воздушных топливных элементов, ветроэлектрических установок, пьезоэлектрических преобразователей, двигателей внутреннего сгорания, твердооксидных топливных элементов, термической переработки органической массы, сезонных колебания температуры окружающей среды, поплавковых электрических станций и т. д.

Важным элементом ЛЭС является накопитель энергии [7]. Накопитель энергии выполняет следующие функции в локальной сети:

– повышает экономическую эффективность сети;

– выравнивает электрическую нагрузку при ее значительных колебаниях;

– служит резервным источником электропитания;

– служит средством коммерциализации энергетики.

В любой ЛЭС планируется использование накопителей энергии. Это позволит выровнять график нагрузок в разные периоды суточного и сезонного спроса на электрическую энергию. Применение накопителей энергии позволит коммерциализировать производство электроэнергии, что повысит эффективность работы энергетических компаний и качество электроснабжения потребителей за счет компенсации недостаточной пропускной способности элементов системы, управления реактивной мощностью, регулирования напряжения, снижения стоимости электроэнергии.

Отдельно следует выделить вопрос создания, так называемой, маневренной нагрузки. В качестве такой нагрузки может рассматриваться, например, теплоаккумулирующее электроотопление, которое использует электроэнергию в ночное время, обеспечивая комфортные условия прожи-

вания людей. Подобные решения в большинстве случаев дают интегральный эффект за счет выравнивания суточного графика электрических нагрузок, снижения требуемого объема маневренной генерации, упрощают обеспечение нормируемого качества электрической энергии т. д.

Интеграция ЛЭС с накопителями энергии в централизованные системы энергоснабжения осуществляется посредством Smart Grids технологий, которые используют усовершенствованную инфраструктуру измерений [8]. Эта инфраструктура позволяет расширить функциональные возможности интегрированной системы посредством использования общих аппаратных средств и единого программного обеспечения. Она способна собирать данные и передавать их другим системам, пересылать информацию через сеть в обратном направлении, т. е. к измерительным приборам для инициирования сбора дополнительных данных, контроля состояния электрооборудования, обновления математического обеспечения. Более того, интеллектуализация сетей дает возможность реализовать функции автоматического обнаружения повреждений, их локализации, изоляции и восстановления электроснабжения.

Экономичность управления ЛЭС достигается за счет возможности комплексного воздействия на параметры режима. Например, регулирование напряжения помимо использования традиционных средств может быть реализовано путем изменения генерации активной или реактивной мощности, воздействием на средства аккумулирования энергии, управлением нагрузкой, этот комплекс мер совместно с аппаратным и программным обеспечением называется энергетическим менеджментом. Энергетический менеджмент, осуществляет:

– менеджмент энергетических данных;

– менеджмент энергоснабжения;

– менеджмент энергопотребления (рассматривают собственно процессы энергопотребления соответствующего объекта) и менеджмент энергетических проектов, нацелены на повышение эффективности использования энергии. В условиях энергетики непрерывного развития эффективность управления процессами генерации, распределения и использованием энергии путем энергетического менеджмента очень важно.

По типу накопителя энергии ЛЭС можно классифицировать следующим образом. Это ЛЭС с электрохимическим накопителем энергии (аккумулятором), с индуктивным накопителем энергии, емкостным накопителем, механическим (кинетическим) накопителем, электромеханическим накопителем, сверхпроводящим накопителем. Выбор того или иного типа накопителя энергии диктуется конкретными техническими условиями эксплуатации ЛЭС и характером поставленной задачи. В таблице представлен пример классификации ЛЭС по указанным признакам.

Пример классификации ЛЭС

Наименование признаков классификации	Исполнение ЛЭС
Вид ЛЭС в зависимости от источника ВИЭ	Ветрогенератор, солнечная панель
Тип накопителя энергии	Кинетический накопитель энергии (КНЭ)
Мощность	5 Квт
Напряжение	220 В
Род тока	Переменный
Тип управления	Интеллектуальное управление
Исполнение	Стационарное
Дополнительная комплектация	Управление через интернет
Область применения	Домохозяйство

Библиографический список

1. Кувшинов, В.В. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии / В.В. Кувшинов, В.А. Сафонов // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – Вып. 3 (31). – С. 158–163.

2. Кирпичникова, И.М. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально-осевых ветроэнергетических установок / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – № 14 (190). – С. 78–81.

3. Солнечная электростанция для параллельной работы / В.В. Харченко, В.А. Гусаров, В.А. Майоров, В.А. Панченко //Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 2. – С. 37–43.

4. Гашо, Е.Г. Пути и проблемы модернизации распределенных энерготехнологических систем регионов / Е.Г. Гашо // Электрика. – 2011. – № 2. – С. 12–17.

5. Чиндяскин, В.И. Разработка компьютерной модели для расчёта эффективной локальной системы электроснабжения сельских поселений / В.И.Чиндяскин, Е.Ф. Киселева // Известия Оренбурского государственного аграрного университета. – 2009. – Т. 2, № 24–1. – С. 88–92.

6. Снижение колебаний энергии в локальных сетях с распределенной энергией / Л.М. Четошникова, Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников, А.Н. Смоленцев // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 37–39.

7. Смоленцев, Н.И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для альтернативной энергетики / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 5. – С. 38–41.

8. Смоленцев, Н.И. Локальная электроэнергетическпя сеть в технологической платформе Smard Grid / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 8. – С. 25–28.

УДК 621.311.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

В.П. Елисеев, М.В. Носиков

Рассмотрена концепция построения системы управления солнечной электростанцией (СЭС) на основе нейронной сети при построении энергетических комплексов на основе альтернативных источников энергии и накопителей энергии. В основу концепции положен принцип создания, ориентированный на выбор СЭС ядром системы и обвязка ядра другими модулями.

Ключевые слова: солнечная электростанция, нейронная сеть, электроэнергетическая сеть, накопитель энергии, альтернативная энергетика.

Основополагающим принципом системы электроснабжения с применением возобновляемых источников энергии, параллельно с традиционными сетями общего применения является модульно-блочное построение и возможность постепенного наращивания вводимых мощностей от возобновляемых источников энергии.

Концепция предполагает построение общей электросети для потребителей и источников генерации, разнесенных по территории на достаточно большие расстояния. Вся энергия солнечной батареи с помощью высокоэффективного преобразователя (до 98 %) постоянного напряжение в переменное, 220/380 В, называемого сетевым инвертором, подается во внутреннюю сеть 380 В [1].

Таким образом, в общую сеть могут быть включены все источники генерации: солнечные батареи, ветроустановки, дизель и бензогенераторы, общественная электросеть. В локальных местах могут быть установлены и аккумуляторные батареи с обратимыми инверторами для разрешения аварийных ситуаций на подводящих электросетях, и обеспечить энергией выделенные нагрузки 1-й категории, например, системы сигнализации и оповещения, связи, системы жизнеобеспечения и автоматики. В таком случае рассчитывается емкость аккумуляторов по суммарной мощности подключенной нагрузки и времени автономной работы (рис. 1).

Чтобы исключить перебои в электроснабжении, жидкотопливный генератор оборудуется системой автозапуска/остановки и по команде инвертора (если в нем есть такая функция) или от специального устройства, производится его запуск. При этом выходная мощность генератора разделяется на два потока: один – транзитом, сквозь инвертор, проходит прямо в подключенную нагрузку, а второй – с помощью встроенного в инвертор зарядного устройства, идет на заряд аккумуляторной батареи. Поэтому,

мощность генератора должна учитывать все нагрузки и иметь еще 30 % запас для надежной работы.

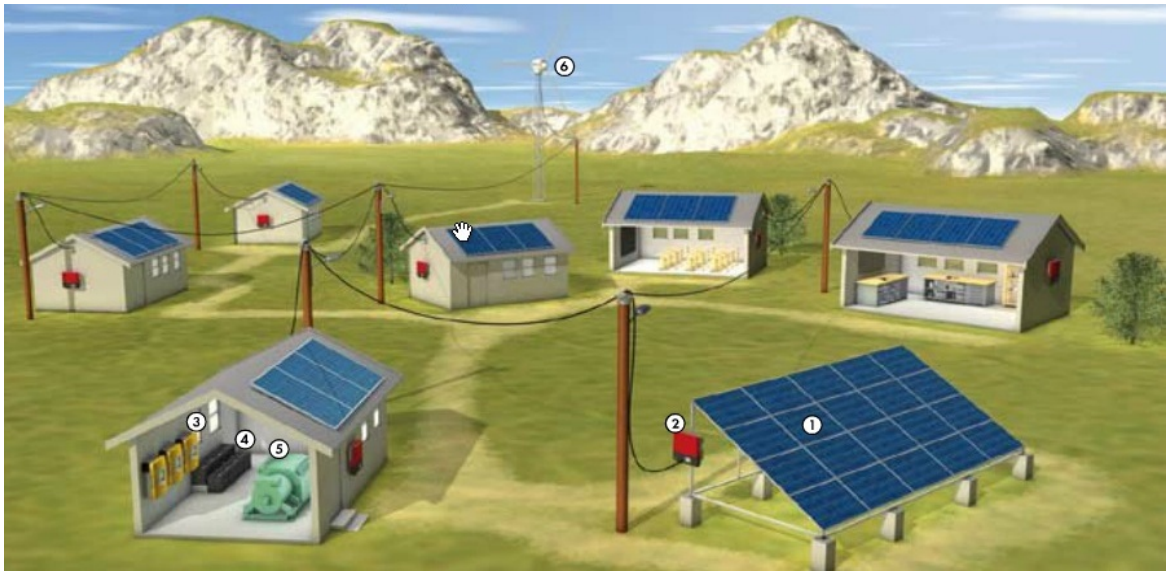


Рис. 1. Локальная электрическая сеть:
1– солнечные панели (СП); 2 – контроллеры управления СП; 3 –инверторы; 4 – накопитель энергии (батарейный блок); 5 – углеводородный генератор (дизельгенератор); 6 – ветрогенератор

Оба эти блока (солнечный и ветро) в данной схеме через сетевые инверторы отдают энергию в сеть энергопотребителям и заряжают аккумуляторную батарею (АКБ), то есть накапливают энергию системы на общем накопителе электроэнергии – АКБ. Данная энергосистема автоматически использует два (и более) вида альтернативной энергии, преобразует в электроэнергию и направляет по мере необходимости энергопотребителям или накапливает на АКБ.

Преимущества такой энергосистемы в том, что два вида энергии (солнечная и ветро) независимы друг от друга, зачастую (во многих регионах планеты) работают в «противофазе». Основная проблема при построении данной системы – это оптимальное управление функционированием системы в целом. То есть задание жестких пороговых значений на включение/переключение не обеспечивает оптимальное управление, а также прогнозирование. Поэтому необходима разработка соответствующего программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего управление функционированием всей системы.

За основное ядро системы управления взята система управлением солнечной электростанцией. Остальные модули управления энергоисточниками (ветроустановкой, гидростанцией, бензогенератором, газогенератором) и локальной сетью будут ведомыми. Но могут использоваться и в качестве основных. При адаптивном управлении используется обучающаяся нейрон-

ная сеть. В настоящее время из всех вопросов, связанных с рациональным использованием указанных энергоресурсов, достаточно глубоко проработан и доведен до уровня практической реализации только вопрос оптимального управления процессом отбора электроэнергии от солнечной батареи. Другие вопросы управления функционированием системы электроснабжения (СЭС) пока исследованы недостаточно полно. В настоящей концепции основное внимание уделено приложению нейросетевых средств к решению основных задач в рамках оптимизации расходования энергоресурсов.

Примеры применения нейронных сетей для оптимального управления СЭС приведены на рис. 2 и 3 [2].

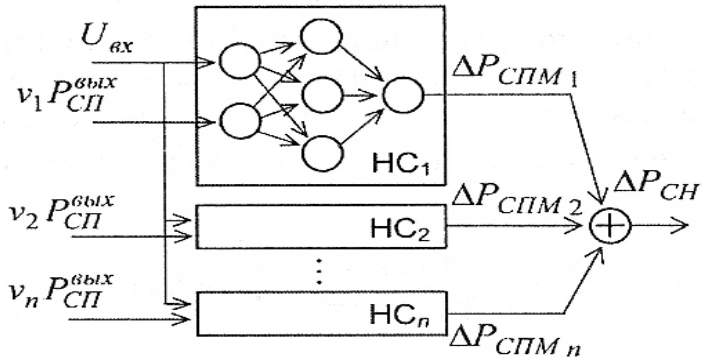


Рис. 2. Структура НС, предназначенной для определения оптимальных коэффициентов токораспределения СЭС: СНП – стабилизирующие преобразовательные модули, НС – нейроные сети, СН – стабилизаторы напряжения

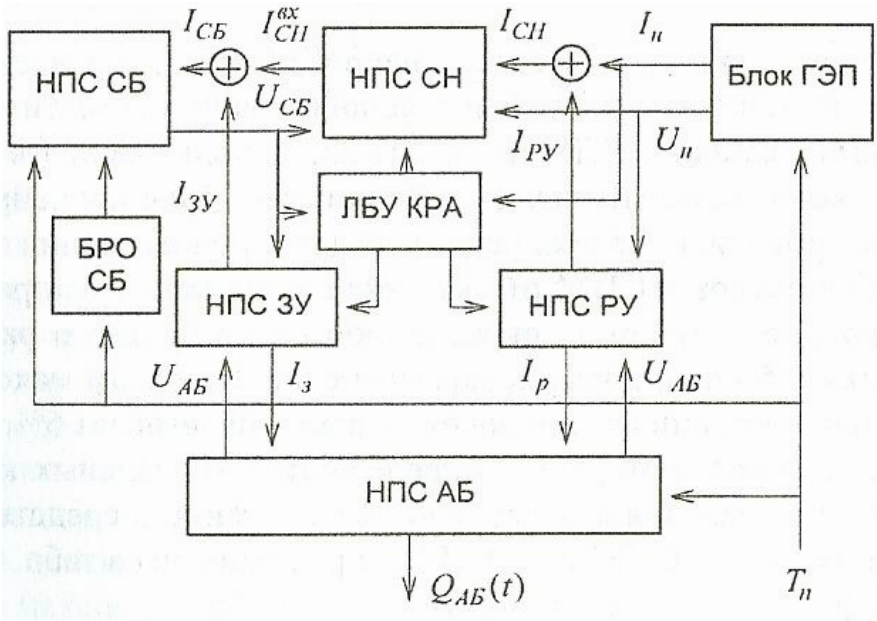


Рис. 3. Общая структура НС, предназначенной для прогнозирования энергетического состояния СЭС: НСП – нейронные подсети; СБ – солнечная батарея; ЗУ – зарядное устройство; РУ – разрядное устройство; ЛБУ КРА – логический блок управления коммутационно-распределительной аппаратуры; БРО СБ – блок расчете освещенности солнечной батареи; ГЭП – блок задания

Такая концепция позволит оптимизировать управления всего энергетического комплекса, сэкономить до 10–15 % энергии. А поскольку энергетика составляет технологический базис промышленности, безотносительно произойдет его качественное изменение на более высокую ступень развития.

Библиографический список

1. Смоленцев, Н.И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для нетрадиционной энергетики / Н.И. Смоленцев, Л.М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 5. – С. 38–41.

2. Галушкин, А.И. Нейрокомпьютеры в космической технике / А.И. Галушкин. – М.: Радиотехника, 2004. – Кн. 17. – С. 29–34.

УДК 621.311.1:658

СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ПРАВИЛ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

В.П. Елисеев, М.В. Носиков

В статье разрабатывается методика, позволяющая повысить скорость разработки баз данных, для нейронных систем управления энергетических объектов. Изменить подход к формированию форматов передачи. А так же, на основе предлагаемой методики можно разработать базы данных позволяющие повысить скорость работы всей системы управления.

Ключевые слова: энергетический объект, нейронная сеть электроэнергетическая сеть, XML-технология, база данных альтернативная энергетика.

Диапазон применения автоматизированных устройств необычайно широк. Применение передовых технологий позволяет разрабатывать системы управления, имеющие способность к обучению, в зависимости от поведения объекта управления. Но возможности локального контроллера ограничены по вычислительным параметрам аппаратного обеспечения. Поэтому для разработки систем управления данного класса необходимо применение специальных подходов к проектированию. То есть изменение архитектуры системы, в зависимости от решаемых задач. Внедрение новейших технологий в процесс разработки, которые позволяют упростить систему в целом, отдельные модули или внутрисистемные связи.

Широкое распространение получили бесплатные интранет технологии, позволяющие решить многие задачи, которые невозможно решить с помощью традиционных подходов.

Сочетание данных технологий с традиционными технологиями дает возможность получения высоких результатов, как в скорости выполнения вычислительных операций, так и в функциональном наполнении приложений.

Одним из направлений бесплатных интранет технологий является xml-технологии, имеющие возможность без перекодировки направлять данные сразу на обработку.

Так же данная методика построения базы данных позволит увеличить качество обслуживания и управления объекта, что немаловажно, поскольку в системах управления последних лет разработок преобладают алгоритмы, заимствованные из нейронных сетей. ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты, особенно в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах. Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сиг-

налами, которые он периодически получает, и сигналами, которые также периодически посылает другим процессорам.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами.

Все системы управления с элементами искусственного интеллекта невозможно построить без Баз Данных.

Значительное повышение качества работы системы дает ее интеллектуализация. На рис. 1 приведена схема системы управления, обладающая элементами интеллекта [1].

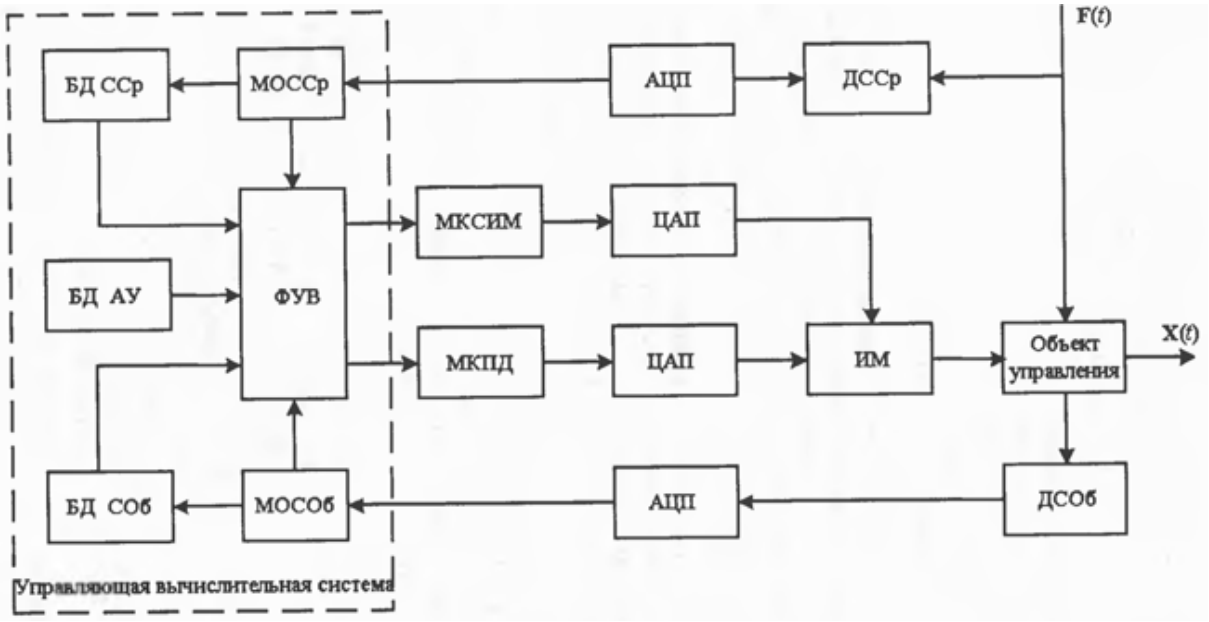


Рис. 1. Система управления с элементами интеллекта

На рис. 1 обозначены: БД ССр – база данных состояния среды; МОССр – модуль оценки состояния среды; ДССр – датчики состояния среды; БД АУ – база данных алгоритмов управления; ФУВ – формирователь управляющих воздействий; ЦАП – цифроаналоговые преобразователи; МКСИМ – модуль коррекции структуры исполнительных механизмов; МКПД – модуль коррекции программного движения; БД СОб – база данных состояния объекта; МОСОб – модуль оценки состояния объекта; ДСОб – датчики состояния объекта; АЦП – аналого-цифровые преобразователи; ИМ – исполнительные механизмы.

Очевидно, что выполнить такой огромный объем вычислительных работ машина с последовательной архитектурой не в состоянии. Выход можно найти лишь в применении параллельных принципов организации обработки информации.

Нейронная сеть является основной операционной частью НК (нейронных ЭВМ), реализующей алгоритм решения задачи [1].

Работа любой НС без применения технологий хранения, архивирования, выборки, поиска и т. д. не возможна. Особенно это необходимо при построении НС локального размещения, т. е. НС расположенных на локальном (удаленном) энергетическом. При принятии решения на удаленном объекте необходимо выполнение таких задач, как распознавание образов, различные виды анализов обстановки и пр. Это накладывает на структуру НС определенные требования. В частности, быстродействие, минимизация аппаратных ресурсов, безопасность, целостность данных и т. д.

Основным недостатком всех БД (как бесплатных, так и коммерческих) является то, что на объекте управления должна быть установлена операционная система (ОС). Установка ОС выдвигает требования к аппаратному обеспечению управляющего объекта. Это ведет к удорожаниюю системы в целом, повышению его массогабаритных характеристик, снижению быстродействия. Все это не позволяет создавать мобильные объекты. При этом еще и снижается надежность системы. Поэтому применение стандартных БД неоправданно на удаленных объектах управления. В качестве БД на удаленном объекте управления предлагается использовать БД, построенной на основе XML-технологии.

Предполагается на борту энергетического удаленного объекта необходимо поместить модуль передачи показаний датчиков, а системе предоставить возможность получения и визуального контроля над этими данными, создание таблиц базы данных и формирование алгоритмов управления [2].

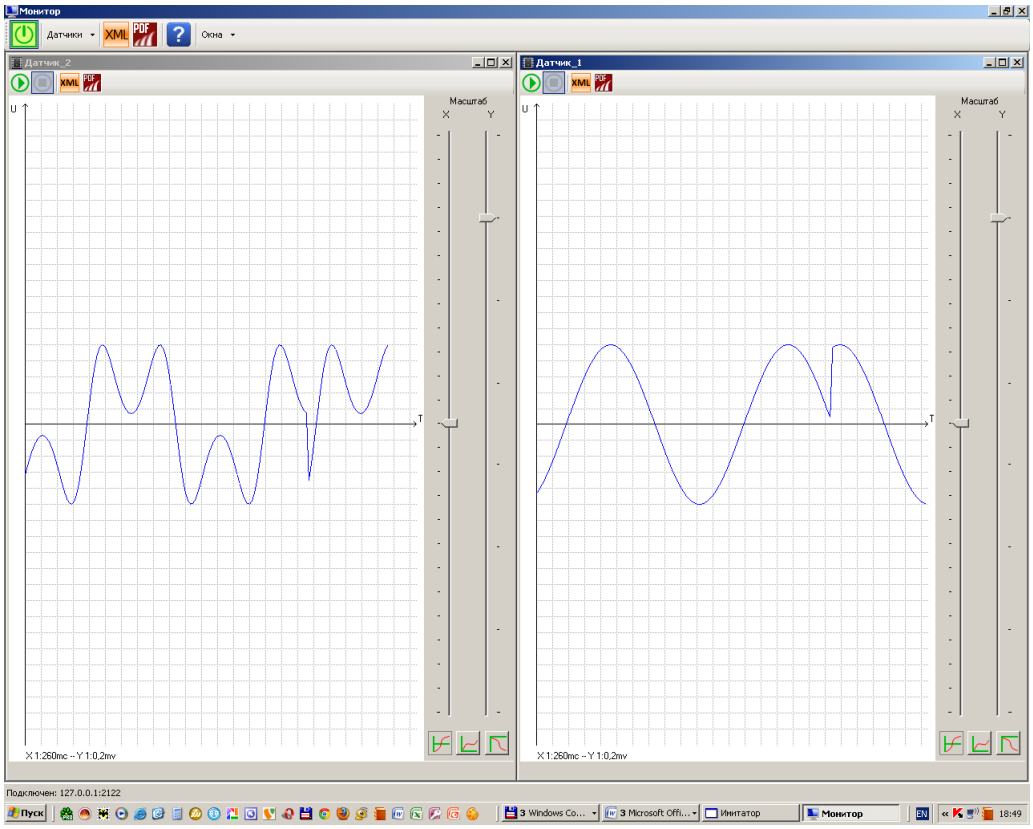


Рис. 2. Окно монитора парсера

Основным источником поступления данных в систему является динамический объект [2]. Основной упор делается, именно, на получение, синхронизацию, визуализацию и конвертирование информации от динамического объекта, т. е. с датчиков (рис. 2).

В парсер введена возможность (на будущее) конвертирование данных не только XML-формат, но в PDF-формат и в графический PNG-формат. Это будет необходимо для формирования отчетов о работе системы. При сохранении информации на носителе в XML-формате мы получаем уже готовые таблицы для XML БД. В дальнейшем их можно использовать для работы НСУ или передачи её на более высокий уровень управления, где она может быть использована без конвертации.

Библиографический список

1. Комарцова, Л.Г. Нейрокомпьютеры: учеб. пособие для вузов / Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2004. – С. 10–20.

2. Елисеев, В.П. Способ ввода данных с датчиков удаленного объекта управления / В.П. Елисеев, С.А. Пислегин // Электрика. – 2012. – № 2. – С. 29.

УДК 621.311.1:658

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

А.В. Брылев

В статье описано оптимальное распределение электроэнергии по уровням приоритетов, роль интернет/GSM-технологий в системе оптимального распределения электроэнергии автономного энергокомплекса.

Ключевые слова: оптимальное управление, автоматическое управление, автономный энергокомплекс, оптимальное распределение электроэнергии.

Важным условием повышения технико-экономических показателей установок на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) является оптимальное регулирование между производством электроэнергии и ее потреблением. На сегодняшний день создано немало алгоритмов управления различных структур и комбинаций установок на основе НВИЭ. Однако полного решения проблем обеспечения бесперебойного и качественного электроснабжения и передачи сигнала не найдено. Это связано, прежде всего, с тем, что при управлении установками на основе НВИЭ и потребителями приходится сталкиваться с комплексом неопределенных исходных данных.

В последнее время выделяется достаточное финансирование различных проектов по производству, улучшению или модернизации энергоустановок на базе НВИЭ, интеллектуальных сетей и т. д. Конечно, определенные успехи в этом направлении уже имеются, хотя доля нетрадиционной энергетики в мировом масштабе энергопроизводства все еще мала, а темпы ее роста отстают от темпов истощения ископаемых видов топлива.

Поскольку не найдено решения массового внедрения установок на альтернативных видах топлива, на данный момент целесообразно разрабатывать и внедрять технологии оптимального управления распределением выработанной комплексной электростанцией электроэнергии между потребителями.

Актуальность данного направления исследований подтверждается тем, что энергоэффективность и энергосбережение входят в пятерку приоритетных направлений технологического развития, сформулированных президентом России в 2009 году.

На сегодняшний день на отечественном рынке представлено мало предложений в данной области технологий. Заграничные технологии не учитывают в полной мере специфику отечественного энергоснабжения, а

отечественные технологии не имеют общей концепции распределения электроэнергии. Есть разработки точечного управления, например, дистанционное управления отопительной системы частного дома, или управление «умным» домом в Белгороде. Но нет технологий самообучающейся системы управления эффективного распределения электроэнергии автономного энергокомплекса.

Основной целью системы автоматизированного управления является качественное и бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией в условиях нормального эксплуатационного режима всех элементов энергосистемы. Достигается это путем выбора наиболее рационального режима энергораспределения:

– при избытке производимой энергии осуществляется электроснабжение всех потребителей, а также происходит зарядка аккумуляторных батарей, если они разряжены. Излишки электроэнергии можно выдавать в промышленную сеть;

– при недостатке вырабатываемой электроэнергии часть энергии идет на заряд накопителя, при условии, что вырабатываемой электроэнергии хватает для снабжения потребителя с наивысшим приоритетом. Также это зависит от краткосрочного прогнозирования поступления первичных энергоресурсов;

– в случае нехватки электроэнергии для групп потребителей с наивысшим приоритетом включается резервный дизель-генератор. Также, если есть возможность заимствование электроэнергии из промышленной сети.

При нехватке электроэнергии распределение энергии внутри каждого потребителя должно осуществляться согласно установленным уровням приоритетов.

К первому уровню приоритетности можно отнести электрооборудование первой необходимости. Это обслуживающие, отопительные системы, основные кухонные бытовые приборы для приготовления пищи (электроплиты), необходимое освещение.

Ко второму уровню приоритета можно отнести то, без чего в современном мире трудно обойтись. Это источники информации (компьютеры или телевизоры), зарядные устройства для телефонов и т. д.

К третьему уровню приоритетности можно отнести бытовые приборы второй необходимости, без которых можно прожить, но они очень облегчают повседневную жизнь. Это утюги, автоматические стиральные машины и пр.

К четвертому уровню приоритетности можно отнести так называемые бытовые приборы роскоши. Это электрические чайники, микроволновки, блендеры, пароварки и т. д.

Все уровни приоритета можно регулировать исходя из нужд потребителя.

Помимо градации по уровням приоритетности управления нагрузкой, немаловажным критерием является разнесение по времени включения электроприборов более низких уровней приоритетов. Например, зарядка телефонов, стирка белья, мойка посуды (в посудомоечных машинах) может осуществляться в ночное время.

Оптимальное управление распределением электроэнергии невозможно без прогнозирования факторов, влияющих на выработку электроэнергии от НВИЭ, и прогнозирования потребления электроэнергии. Разработано большое количество методов и моделей прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. Анализ разработанных методов прогнозирования показал, что практическое применение их связано с определенными трудностями. Одни методы приводят к значительным погрешностям в оценке прогнозируемых величин, другие из-за сложности математического аппарата не получили широкого применения для решения практических задач электроэнергетики. Однако без прогнозирования факторов, влияющих на производство электроэнергии, невозможно полное планирование ее потребления [2].

Естественно, реальная система управления должна устойчиво управлять объектом управления не только на «детерминистских» участках его истории, но и в точках, в которых его дальнейшее поведение становится неопределенным и непредсказуемым. Уже одно это означает, что необходимо разрабатывать подходы к управлению системами, в поведении которых иногда или постоянно присутствует существенный элемент случайности, вследствие чего для лучшего функционирования системы управления необходимо вводить элементы обучения СУ [3, 4].

Обучение СУ должно осуществляться по результатам сравнения заложенных эталонов с текущем состоянием объектов управления. В случае несовпадения ни с одним заложенным эталоном система управления должна выбрать наиболее подходящий эталон и указать пользователю на признаки, не совпадающие ни с одним эталоном. По результатам сравнения пользователь сам принимает решение об управлении распределением электроэнергии и по необходимости формирует новые эталоны или корректирует старые.

В то же время всегда есть вероятность ошибки, поэтому система управления должна сообщать о принятом решении пользователю по средствам Интернет-технологий или GSM. Удаленный контроль позволяет отслеживать работу оборудования, находясь на удалении от дома, в рабочее время или, например, на отдыхе (в общем, везде, где есть доступ к интернету). Зайдя в личный кабинет на сайте, пользователь, может наблюдать и управлять в режиме реального времени за работой электрооборудования дома.

Адаптивная система управления распределением электроэнергии позволит производить:

– автоматизацию оценок состояния электросети потребителя и их замену оценками непосредственного пользователя;

– обучение программы управления путем составления новых классов распознавания состояния объектов управления;

– взвешенное обобщение оценок рациональности режимов энергораспределения;

– определение фактической приоритетности нагрузок и при необходимости перераспределения приоритетности нагрузок путем корректировки или создания новых эталонных выборок.

– оповещать пользователя о принятом решении выбора режима управления распределением электроэнергии.

Основная идея эффективного распределения вырабатываемых комплексной электростанцией мощностей состоит в том, что применение обучающейся с экспертом (пользователем) адаптивной модели позволяет выявить зависимости между факторами и режимами энергораспределения и выбрать оптимальный режим работы системы.

Библиографический список

1. Усков, А.А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой / А.А. Усков // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2004. – № 6. – С. 7–13.

2. Манусов, В.З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами / В.З. Манусов, Е.В. Бирюков // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2006 – С. 153–158.

3. Симанков, В.С. Синтез адаптивных САУ ФВЭУ с применением моделей распознавания образов и принятия решений, основанных на теории информации / В.С. Симанков, И.В. Зайцев, Е.В. Луценко // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: сб. тез. докл. 1-й Всерос. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород: НГТУ, 1999. – С. 12.

4. Симанков, В.С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов: моногр. / В.С. Симанков, Е.В. Луценко. – Краснодар: Изд-во ТУ КубГТУ, 1999 – 318 с.

УДК 620.9.004.8

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ УСТАНОВОК ЭНЕРГЕТИКИ ВИЭ

А.И. Гуськова

В статье отображены тенденции развития распределенной энергетики в России и в странах Евросоюза. Рассмотрена ситуация, сложившаяся в России к 2011 году. Необходимость, перспективы и положительный эффект развития систем установок возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: распределенная генерация, возобновляемая энергетика, формирование условий.

Распределенная генерация и возобновляемая энергетика на сегодняшний день являются основными направлениями развития энергетики во всем мире, играют существенную роль в повышении надежности и качества поставляемой электроэнергии.

Начало планомерному развитию распределенной энергетики в странах Евросоюза положило соглашение о политике в области энергетики 1997 года, где изложена долгосрочная стратегия реструктуризации энергетической системы на основе принципов надежности снабжения, конкурентоспособности, охраны здоровья, окружающей среды и климата, а также постепенного отказа от атомной энергетики. Краткосрочная политическая программа в области энергетики и долгосрочная программа были завершены в 2002 и 2004 гг., соответственно. Целью текущей политики правительства в области энергетики являются создание условий для эффективных энергетических рынков, надежность снабжения и комплексная забота об окружающей среде, здоровье и климате. Она предусматривает снижение среднегодового потребления электроэнергии к 2020 г. на 20 %. Для достижения этой цели необходимо снижение потребления электроэнергии на 1,5 % ежегодно. А также действует программа «Умная энергия для Европы», на финансирование которой выделено 3,6 млн евро. Программа направлена на использование возобновляемых энергоресурсов. Развитие распределенной генерации в странах Евросоюза всячески поддерживается государством. Предусмотрены следующие механизмы поддержки развития:

- Австрия:

Тарифная поддержка когенерационного электричества (4 евро/МВт·ч);

- Болгария:

Обязательность покупки, тарифная поддержка, капиталовложения для мощностей менее 50 МВт;

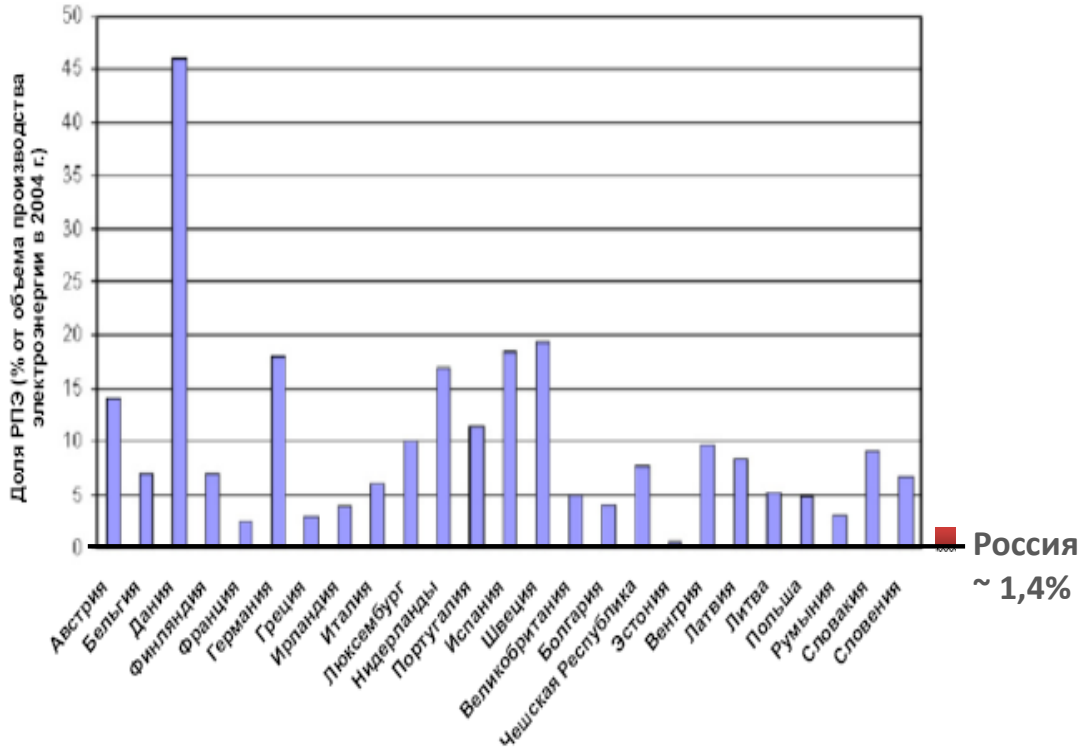
• Дания:

Обязательность покупки, тарифная поддержка, скидки и освобождение от налогов, капиталовложения, фиксированные цены на когенерационную мощность;

• Германия:

Обязательство «допуска в сеть» и/или покупки сетевыми компаниями электроэнергии, вырабатываемой в режиме когенерации, тарифная поддержка объектов когенерации, налоговое стимулирование объектов когенерации, компенсация доли капитальных вложений в объекты когенерации, стимулирование через торговлю ЕСВ.

Вышеперечисленные меры являются предпосылками для развития распределенной энергетики. По данным энергетического агентства лидирующую роль среди стран Европы занимает Дания (см. рисунок).



Доля распределенного производства в общем объеме производства электроэнергии в 25 странах ЕС

В 2011 году установленная мощность электростанций России составила 223,6 ГВт. Установленная мощность объектов малой распределенной генерации составила 3,2 ГВт (в зоне централизованного энергоснабжения электроэнергетического сектора) или 1,4 % от суммарной установленной мощности. В настоящее время электроэнергетический комплекс России представляет собой сверхцентрализованную энергетику крупных мощностей (59 электростанций с мощностью более 1000 МВт, 37 – от 500 до 1000 МВт) с большой протяженностью линий электропередачи (2614 тыс. км).

Это, безусловно, приводит к увеличению непроизводительных расходов, потерям в результате большой протяженности линий и морального и технического устаревания оборудования. Малую распределенную энергетику характеризует, прежде всего, близость к потребителю, близость не к передающим, а к распределенным сетям. Две трети огромной территории России – это труднодоступные, удаленные места. И зачастую другого варианта, кроме как распределенная энергетика или ВИЭ, там нет, в силу того, что работать там сложно и дорого. Распределенная энергетика особенно востребована в сфере коммунального теплоснабжения, где есть огромное количество неэффективных котельных, которые и по уровню износа, и по технологиям не соответствуют сегодняшнему времени. Она также необходима промышленным потребителям, желающим оптимизировать свое энергоснабжение. Чтобы повысить экономическую эффективность энергосистемы необходимо развивать распределенную энергетику. К минимальным мерам, которые будут способствовать развитию отрасли возобновляемой энергетики, можно отнести:

- приоритет ввода новых генерирующих мощностей с использованием технологий когенерации;
- нормативный запрет на строительство (реконструкцию) котельных без проработки вариантов строительства когенерации;
- приоритет при продаже электроэнергии и тепла от когенерационных установок;
- упрощение Правил технического присоединения к электрическим сетям;
- предоставление льготных инвестиционных кредитов для отечественных производителей оборудования;
- предоставление государственных потребительских кредитов на приобретение отечественного оборудования.

Первый Федеральный закон, связанный с энергосбережением, в современной России был принят в 1996 году (№ 28-ФЗ). Однако он был недостаточно проработанным и практически ни к каким реальным результатам не привел. В последующие годы реализация политики энергосбережения в стране по различным причинам существенно замедлилась и возобновилась вновь лишь после Указа Президента РФ № 8891 и принятия Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении…».

Становление мощной самостоятельной подотрасли малой и возобновляемой энергетики является основой перехода энергетики России на путь инновационного развития. Необходимым является развитие законодательства, формирование институциональных условий и реализация механизмов финансовой поддержки малой и возобновляемой энергетики. На сегодняшний день возможно внедрение двух механизмов финансового стимулирования развития ВИЭ:

- механизм использования надбавки для определения цены электрической энергии, произведенной на функционирующих на основе использования ВИЭ квалифицированных генерирующих объектах;
- механизм долгосрочных договоров купли-продажи мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, по особой цене.

Положительные эффекты от развития распределенной энергетики:

- экономия, по сдержанным оценкам, 50 млн тонн условного топлива в год (~12 % от нынешнего топливопотребления);
- сокращение потерь электро- и теплоэнергии в сетях;
- сокращение тарифов и платежей потребителей за тепло и электроэнергию;
- повышение качества и надежности электро- и теплоснабжения потребителей, повышение энергобезопасности;
- рост качества жизни, особенно в малых и средних населенных пунктах.

Библиографический список

1. АВОК, № 8, 2011.
2. Новости теплоснабжения, № 03 (43), март 2004.
3. Газета, № 19 (207) октябрь 2012.
4. http://www.iea.org/stats/index.asp – официальный сайт международного энергетического агентства, раздел статистика.

УДК 629.114.4.012.8

ПОДВЕСКА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С АМОРТИЗАТОРОМ АДАПТИВНОГО ТИПА

М.И. Абрамов

Конструктивные особенности подвески грузового автомобиля с регулируемыми элементами подрессоривания. Описывается характеристика адаптивного амортизатора и приводится уравнение рабочей характеристики.

Ключевые слова: подвеска автомобиля, грузоподъемность, скорость движения, вибронагруженность.

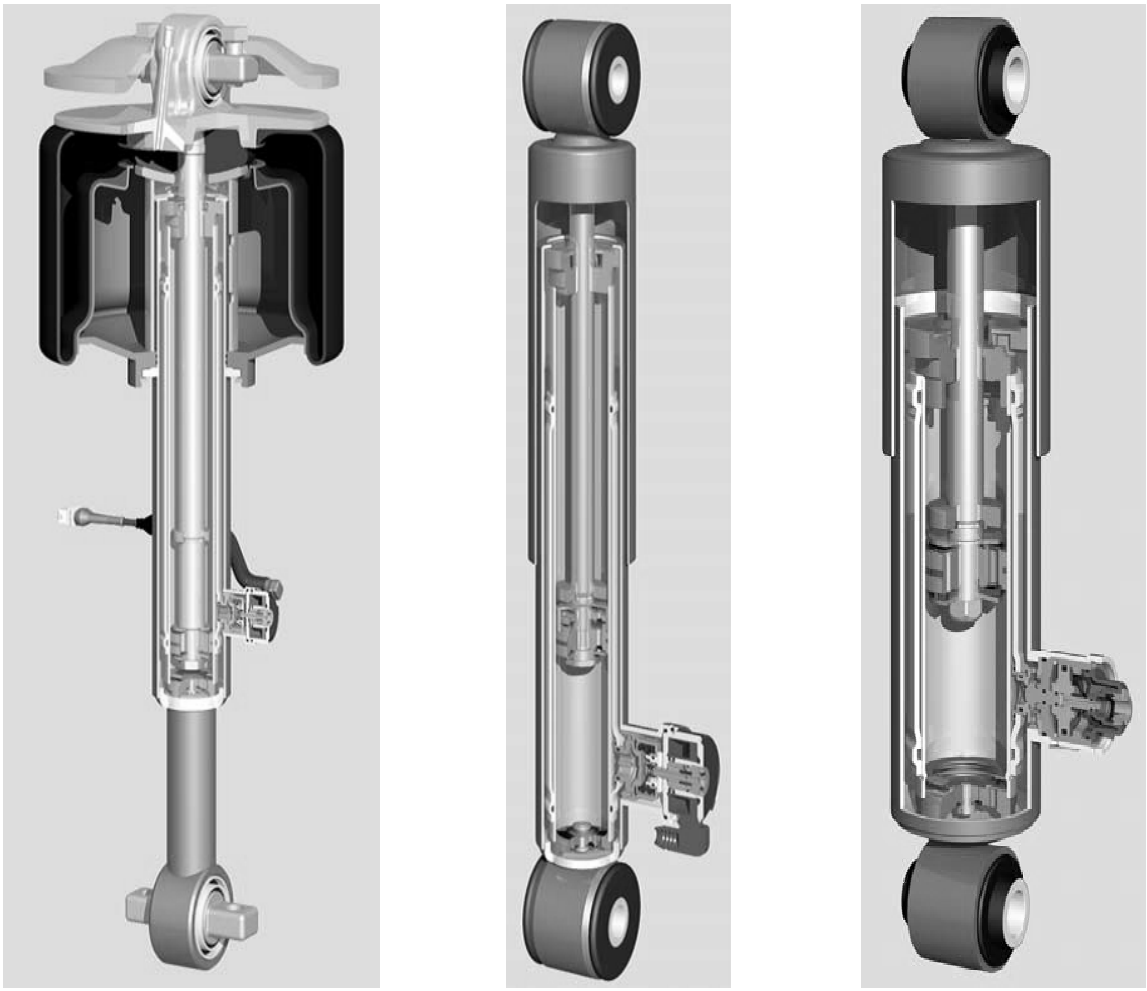
Современные грузоперевозки, ориентированные на повышение производительности и снижение затрат, требуют от производителей грузовой техники повышения как удельной грузоподъемности, так и средней скорости движения. Как известно [1], при увеличении скорости движения повышается вибронагруженность автомобиля. Одним из основных конструктивных средств, обеспечивающих вибрационную безопасность и комфорт на рабочем месте водителя (РМВ), является подвеска автомобиля.

Производитель отечественной грузовой техники, оснащая автомобили современными мощными двигателями, недооценивает конструктивных особенностей подвески. Это подтверждается тем, что на практике водитель вынужден ограничивать скорость движения грузового автомобиля из-за высокой вибронагруженности РМВ [5]. Основной проблемой этому является применение стандартных амортизаторов, параметры которых не согласованы с колебательной системой конкретного автомобиля. Чтобы компенсировать нагрузки на автомобиль со стороны дороги при высоких скоростях движения целесообразно применять регулируемые элементы подрессоривания.

С развитием новых поколений грузовиков, на которых применяются электронные системы управления трансмиссией, тормозной системой, курсовой устойчивостью и т. д., в подвеске все более активно используются модульные пружинно-амортизаторные системы и амортизационные системы активного и полуактивного действия [2]. К наиболее применяемым на грузовых автомобилях системам регулирования в настоящее время относят: двухтрубные амортизаторы с технологией Vario, системы переменного сопротивления Continuous Damping Control (CDC) и Pneumatic Damping Control (PDC) [3].

Наиболее перспективными системами к применению на отечественных грузовых автомобилях с технико-экономической точки зрения считаются полуактивные адаптивные системы подрессоривания [2]. В отличие от существующих пневмо-гидравлических подвесок активного типа, для регу-

лирования характеристик полуактивные подвески не требуют применения отдельного гидро- и пневмопривода, что значительно удешевляет конструкцию автомобиля. Обеспечение регулирования характеристик подвески осуществляется на основании классической схемы гидравлической амортизации закрытого типа (гидравлический амортизатор) с дополнительным электромагнитным клапаном, имеющим электронное управление.



а) б) в)

Рис. 1. Регулируемые амортизационные системы грузового автомобиля:
а – пневмо-гидравлическая рессора с системой переменного сопротивления;
б – двухтрубный амортизатор с регулируемым клапаном CDC;
в – двухтрубный амортизатор с регулируемым клапаном PDC

С точки зрения экономической целесообразности регулируемые амортизаторы являются опцией автомобиля, которую заказчик приобретает для повышения производительности транспортного средства. Поэтому габаритные размеры регулируемого амортизатора не должны отличаться от стандартного амортизатора. Это компоновочное условие возможно реа-

лизовать за счет выноса электроклапана на корпус амортизатора (рис. 2). При этом в зависимости от производительности электроклапана, поршень амортизатора изготовляется либо полнотелым, либо с перепускными клапанами. Производительность электроклапана зависит от его быстродействия, что обеспечивается, во-первых, уравновешиванием давления жидкости на подвижной части клапана, а, во-вторых, за счет конструктивных особенностей дросселирующих каналов и точности их изготовления.

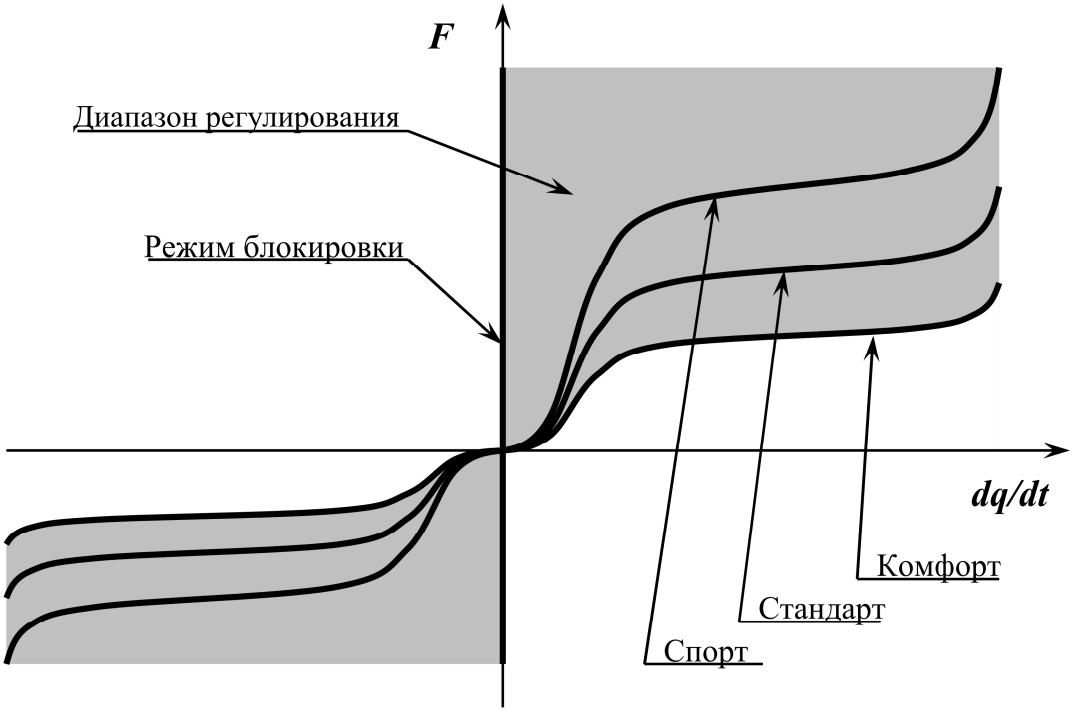


Рис. 2. Диапазон регулирования рабочей характеристики адаптивного амортизатора

На Автотракторном факультете ЮУрГУ разработана конструкция адаптивного амортизатора подвески, отличающаяся сверхшироким диапазоном регулирования диссипативных (рабочих) характеристик [4]. В настоящее время данная конструкция адаптируется к особенностям подвески грузового автомобиля.

Дадим краткую характеристику функциональным возможностям представленной конструкции. Если характеризовать конструкцию предлагаемого адаптивного амортизатора, то можно сделать вывод, что в структурном отношении амортизатор включает два взаимосвязанных между собой основных узла [4]: собственно амортизатор, т. е. цилиндропоршневой узел и электрогидравлический клапан. Эти два узла по-разному влияют на формирование четырех основных вариантов оперативного управления рабочими (диссипативными) характеристиками амортизатора. Управляющий параметр амортизатора $\boldsymbol{p = col(q, i)}$ – матрица-столбец размера 2×1. Здесь

q – координата, определяющая положение поршня от его центрального положения в рабочем цилиндре, ***i*** – величина управляющего тока в электрогидравлическом клапане. Основным, определяющим компонентом управляющего воздействия на адаптивный амортизатор является величина управляющего тока ***i***. Именно варьированием величиной ***i*** достигается реализация сверхширокого диапазона регулирования диссипативных характеристик адаптивного амортизатора.

В зависимости от вида функции ***i* = *i*(*t*)** и от способа её формирования могут иметь место следующие четыре варианта организации оперативного управления диссипативными характеристиками амортизатора: автономный режим, режим блокировки амортизатора, режим ручного управления и режим автоматического управления. Получаемый диапазон регулирования диссипативных характеристик представлен на рис. 2.

В автономном режиме регулирование диссипативных характеристик осуществляется по алгоритму стандартного гидравлического амортизатора. При этом обеспечиваются традиционные дорожно-скоростные режимы.

В режиме блокировки амортизатора поршень занимает крайние положение (верхнее или нижнее), соответствующее максимальному ходу. При этом амортизатор превращается в единое жесткое звено. Данный режим обеспечивает минимальный уровень крена подрессоренной части при маневрировании.

В режиме ручного управления водитель выбирает один из заданных режимов движения (стандарт, спорт, комфорт), в результате чего реализуется требуемый алгоритм управления электромагнитными клапанами амортизаторов автомобиля.

В режиме автоматического управления управляющее воздействие осуществляется в автоматическом режиме в соответствии с установленной программой. Диссипативная характеристика изменяется автоматически в зависимости от хода поршня и скорости его перемещения, т. е. силы сопротивления.

На основании вышеизложенного в предлагаемой конструкции адаптивного амортизатора уравнение рабочей характеристики имеет вид

$$F = F(dq/dt;\ p),\quad p = col(q,\ i),$$

где ***F*** – усилие на поршне амортизатора, Н; ***dq/dt*** – скорость поршня, м/с.

Таким образом, обобщая выше изложенное, наиболее перспективной конструкцией для широкого потребления на различных классах грузовых автомобилей следует считать регулируемый амортизатор адаптивного типа с выносным электроклапаном, высокая производительность которого обеспечивается за счет конструктивных особенностей дросселирующих каналов. При этом можно упростить конструкцию поршня и использовать габариты стандартного амортизатора. Электронная система управления та-

кого элемента подвески должна быть интегрирована в существующую систему управления автомобилем.

Такие конструкции регулируемых амортизаторов следует классифицировать как полуактивные адаптивного типа.

Библиографический список

1. Дербаремдикер, А.Д. Амортизаторы транспортных машин / А.Д. Дербаремдикер. – М.: Машиностроение, 1985. – 200 с.

2. Мельников, А.А. Управление техническими объектами автомобилей и тракторов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.А. Мельников. – М.: Издат. центр «Академия», 2003. – 376 с.

3. Техническое обучение. Система привода и подвеска грузовиков. ZF Trading GmbH. – htpp://www.zf.com/eu/content/sachs_ru.pdf (дата обращения: 18.02.2013).

4. Пат. 2474739 Российская Федерация, МПК F16F9/16. Адаптивный амортизатор подвески транспортного средства / А.Ф. Дубровский, С.А. Дубровский, О.А. Дубровская. – Заявл. 19.10.2011; опубл. 10.02.2013.

5. Старцев, А.В. Улучшение прямолинейного движения транспортных агрегатов / А.В. Старцев, В.В. Краснокутский // Совершенствование агротехники и технологии возделывания сельскохозяйственных культур: тр. Института агроэкологии ЧГАУ. – Челябинск, 1996.

УДК 378.147.88 + 378.016:621.01

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ НА ПРИМЕРЕ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН»

В.А. Волохов

Проведен анализ применения компьютерных технологий при изучении дисциплины «Теория механизмов и машин», рассмотрены возможности специальной компьютерной программы rm.exe.

Ключевые слова: информационные технологии, теория механизмов и машин, курсовое проектирование, методы расчета.

Подготовка инженеров для промышленных предприятий является важнейшей задачей современного государства. Применение информационных технологий в подготовке бедующего специалиста позволяет мотивировать его к работе, поскольку усиливает связь с будущей профессией. Современные информационные технологии, так или иначе связанные с применением компьютера, позволяют избавить студента от рутинной работы, дают возможность студенту больше времени уделить творческой составляющей конструкторской работы, сократить время на проектирование и расчеты, а также получить практический навык работы по своей будущей профессии.

Одной из классических задач при изучении дисциплины «Теория механизмов и машин» (ТММ) является кинематический и силовой анализ плоских шарнирно-рычажных механизмов (ПШРМ) [1]. Определение скоростей и ускорений точек многозвенного механизма аналитическим методом связано с определенными математическими трудностями (в частности, необходимо вычислять производные по времени от сложных функций). Поэтому для расчета многозвенных механизмов традиционно используют графо-аналитические методы [1, 2] (например, метод построения планов скоростей и ускорений). Хотя решение задачи графо-аналитическим методом довольно простое и наглядное, у этих методов есть существенные недостатки:

– недостаточно высокая точность;

– расчет проводиться для фиксированного положения механизма, при этом сам механизм необходимо вычерчивать в заданном масштабе (т. е. строго соблюдать пропорциональность длин звеньев);

– при изменении параметров или положения механизма приходится заново вычерчивать это новое положение и выполнять расчет.

Таким образом, графо-аналитические методы в принципе не позволяют получить непрерывной картины изменения кинематических параметров механизма, а для исследования ряда дискретных положений необходимы

значительные затраты сил и времени. Кроме того, непрерывная зависимость скоростей и ускорений точек механизма от времени или от угла поворота ведущего звена позволяет определить «критические» положения механизма, в которых ускорения могут достигать очень больших значений. Большие ускорения в свою очередь приводят к возникновению значительных сил инерции, и в конечном счете вызывают дополнительные динамические реакции в опорах (в подшипниках) при работе механизма. Эти «критические» положения необходимо определять ещё на стадии проектирования механизма, а графо-аналитические методы не всегда позволяют сделать это. Определение приведенных силовых и массовых факторов механизма (приведенного момента сил сопротивления $M^{Q}_{пр}$ и приведенного момента инерции $1_{пр}$) [1], используемых при решении задач динамики механизмов, требуют кинематического анализа механизма на уровне задачи скоростей также для нескольких положений механизма.

Таким образом, очевидно, что рациональное решение рассматриваемых задач возможно только при использовании компьютерных технологий.

Система **MathCAD** [3] позволяет достаточно эффективно решать задачи по расчету кинематических характеристик многозвенных механизмов, исследовать движение материальных точек и тел под действием приложенных сил; производить вычисления производных от различных функций и интегрировать дифференциальные уравнения движения. Причем результаты расчетов можно представить в различных формах (в виде дискретных значений величин при изменении параметров системы или в виде непрерывных функций на графиках), а также провести визуализацию решения (создать видеоклип) и увидеть исследуемый процесс в динамике. Однако применение **MathCAD** при изучении теории механизмов и машин связано с определенными трудностями, главными из которых являются:

1. Работа в системе **MathCAD** требует специальных навыков.
2. Прежде чем использовать **MathCAD** в качестве вычислительной программы, необходимо вывести аналитические расчетные формулы, а в случае многозвенных механизмов аналитические зависимости получаются крайне сложными, и соответственно, неприемлемы для студентов.

Поэтому для решения специфических задач ТММ применение системы **MathCAD** существенно ограничено.

Для выполнения расчетов в курсовом проекте по дисциплине ТММ на кафедре «Основы проектирования машин» ЮУрГУ разработана специальная компьютерная программа **rm.exe** [2]. Программа разработана с учетом максимального удобства пользования при выполнении кинематического и силового анализа ПШРМ и представляет собой систему автоматизированного курсового проектирования (САКПР), обеспечивающую комплексное компьютерное моделирование студентом структуры, кинематики и динамики проектируемого рычажного механизма.

Разработанная программа осуществляет:

а) структурный синтез механизма путем задания групп Ассура [1], из которых должен быть образован механизм, и параметров их сборки;

б) построение кинематической схемы для любого из 12 расчетных положений в пределах кинематического цикла;

в) проверку правильности структурного и метрического синтеза механизма – при наличии ошибок не выполняются условия кинематической работоспособности и программа предупреждает об этом;

г) полный кинематический и силовой анализ механизма, а также определение его приведенных силовых и массовых факторов;

Расчету по программе **rm.exe** поддаются наиболее распространенные шестизвенные и четырехзвенные (элементарные) ПШРМ, структура которых отвечает следующим условиям:

а) начальное звено 1 является кривошипом и поэтому образует со стойкой вращательную кинематическую пару (КП);

б) механизм относится ко второму классу, т. е. состоит из групп Ассура только второго класса;

в) группы Ассура, входящие в состав механизма, присоединены последовательно, т. е. формула строения механизма имеет линейную структуру;

г) из четырехзвенных (элементарных) механизмов программа пригодна для шарнирного четырехзвенника, кривошипно-ползунного и кривошипно-кулисного механизмов [1].

Программа определяет следующие параметры:

1. Веса звеньев, моменты инерции относительно центров масс звеньев и положения центров масс звеньев механизма на основании рекомендаций справочных изданий в зависимости от длин звеньев.

2. Координаты точек звеньев механизма, а также углы наклона звеньев (задача положений кинематического анализа). Расчет проводится в системе ортогональных координат XOY с началом координат на оси вращения кривошипа. Расчет по программе производится для 12 равноотстоящих положений кривошипа в пределах кинематического цикла (т. е. одного оборота кривошипа), что соответствует углу поворота кривошипа между соседними положениями, равному 30°. Положения механизма нумеруются от 1 до 12, начиная с начала рабочего хода и в последовательности, соответствующей направлению вращения кривошипа.

3. Скорости и ускорения всех шарнирных точек механизма и центров масс звеньев, а также угловые скорости и угловые ускорения звеньев (задачи скоростей и ускорений); перечисленные параметры определяются по величине и направлению. Расчитываемые положения те же, что и в п. 2. Результаты решения выводятся для одного положения, номер которого задается при вводе исходных данных.

4. Реакции в кинематических парах и уравновешивающий момент (силовой расчет); параметры определяются по величине и направлению. Расчитываемые положения и вывод результатов те же, что и при кинематическом анализе (см. п. 2, 3).

5. Приведенный момент сил сопротивления $M^{Q}_{пр}$ и приведенный момент инерции $1_{пр}$ для 12 положений механизма;

6. По результатам силового расчета выявляются максимальные реакции и соответствующие им положения механизма.

Методика выполнения курсового проекта по дисциплине ТММ с применением компьютерной программы **rm.exe** внедрена и успешно реализуется в Миасском филиале ЮУрГУ с 2003 года. Благодаря этому, компьютер в учебном процессе используется непосредственно для расчетов параметров механизма, а студенты могут самостоятельно проверить результаты своих вычислений, выполненных графо-аналитическими методами, сравнивая их с компьютерным расчетом. Вычисление приведенных силовых и массовых факторов по программе **rm.exe** дает возможность выполнить расчет маховика по методу Виттенбауэра [1] (расчет приведенных факторов вручную крайне затруднителен). Кроме того, несомненным достоинством программы **rm.exe** является простота ее использования, программа не требует установки на жесткий диск компьютера (может запускаться и работать с флэш-карты), потребляет минимум ресурсов компьютерной системы. Для обучения студентов работе с программой **rm.exe** достаточно одного 2-часового занятия.

Библиографический список

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов / И.И.Артоболевский. – М.: Наука, 1967. – 720 с.

2. Пожбелко, В.И. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин: учеб. пособие для самостоят. работы студентов / В.И. Пожбелко, П.Г. Виницкий, Н.И. Ахметшин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – Ч. 1. –108 с.

3. Бертяев, В.Д. Теоретическая механика на базе MathCad. Практикум / В.Д. Бертяев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 358 с.

УДК 725.892(470.55)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТО В МИАССКОМ ГОРОДСКОМ ОКРУГЕ

В.А. Камерлохер

Областной автоспортивный комплекс, включающий в себя: гоночный трек для различных видов гонок (дрэг, дрифт, кольцо, автокросс, картинг), грузовой автосервис, сеть автокомплексов (под новым брендом), оказывающих все виды автоуслуг, кафе, гостиничный комплекс и многое другое. Автокомплекс включает в себя: автосервис, автомойку, шиномонтаж, магазин, тюнинг-сервис, АЗС. Уникальное решение дизайна автокомплекса, не имеющее аналогов в мире.

Ключевые слова: автоспортивный комплекс, гоночный трек, автокомплекс, автокросс, картинг, автоуслуги.

Перспективы развития проекта

В России пока 6 гоночных треков. В 2014 их будет уже 8, не считая данный проект.

Рис. 1. Планировка Автокомплекса

Обзор планируемого рынка сбыта

Рынок автосервисных услуг растет за счет роста количества автомобилей. В год число автомобилей увеличивается на 5 %. На каждую 1000 жителей России приходится в среднем по 250 легковых автомобилей, в Европе в среднем 480. При росте автопарка необходим рост числа автосервисов.

Единственная действующая трасса для автокросса в Челябинской области, расположенная в г. Златоусте, фактически прекратила свое существование.

Челябинской области нужна площадка (рис. 1) для проведения автосоревнований.

Покрытие трека (рис. 2) будет соответствовать всем стандартам. Появится отличное место для активного отдыха.

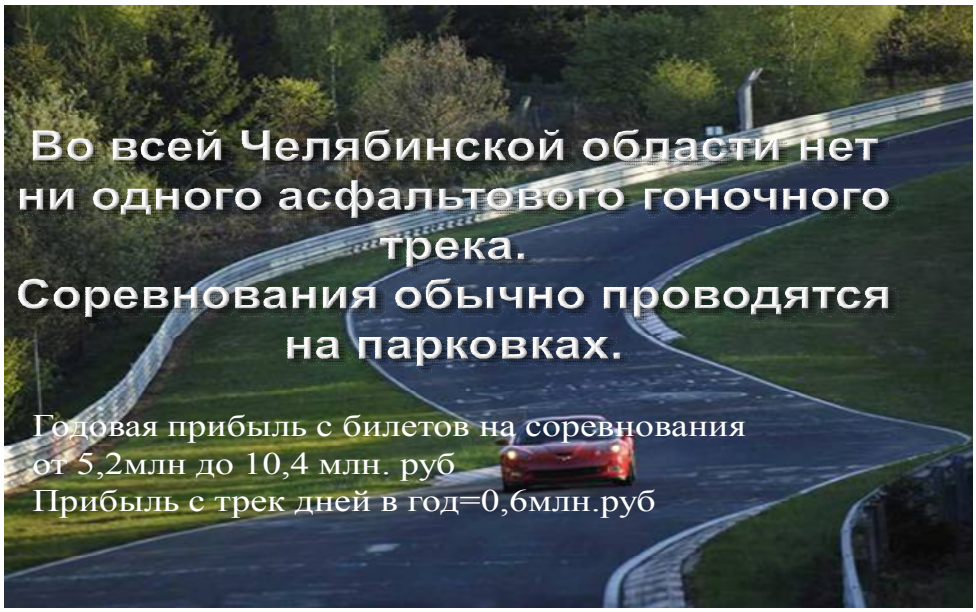


Рис. 2. Участок гоночного трека

В Миассе дефицит качественных услуг автосервиса.

– 70 000 автомобилей (примерно 60 000 на ходу);

– 160 000 жителей;

– Половина автовладельцев ремонтируют автомобили самостоятельно, либо в гаражных мастерских;

– У нас зарегистрировано официально 34 автосервиса различной направленности (данные с Миасского сайта);

– Гаражный бокс (каких в нашем городе очень много) не является полноценным автосервисом!!!

По статистике сайта www.investtocar.ru:

⊡ В среднем автовладелец тратит 19 136 рублей в год на свой автомобиль. Не считая расходы на бензин.

⊡ По этим данным расход на автомобиль в Миассе равен:

19 136 · 60 000 = 1 148 160 000 рублей.

⊡ *Полученная годовая прибыль составит примерно 30 % от этой суммы = 344 448 000 рублей*.

⊡ В месяц сумма составляет 28 млн 704 тыс. рублей.

⊡ Большую долю рынка автоуслуг занимают гаражные мастерские!

Автосервис

⊡ Автосервис на 15 постов (5 рабочих дней).

⊡ Выполняются все виды работ.

⊡ Автосервис сможет обслужить примерно от 100 до 1000 машин в месяц. В год примерно 12 000 машин.

⊡ В Миассе в год одним автовладельцем на ремонт тратиться примерно 2234 рубля.

⊡ 3 машины в день на один пост, 45 машин в день, 900 в месяц, 10800 в год.

⊡ 2234 · 10 800 = 24 127 200 рублей.

⊡ Прибыль автосервиса составит: 24 127 200 руб. Из них выплачиваем заработную плату работникам автосервиса и остается 15 127 000 рублей.

В наше время, среди молодежи и не только, большое внимание уделяется внешнему виду и дизайну автомобиля, поэтому в городе нужен тюнинг – сервис.

Рекламная кампания должна включать в себя:

1) разработку фирменного стиля;
2) формирование полного пакета рекламной продукции;
3) выбор методов продвижения услуг автокомплекса.

Прибыль с рекламы

⊡ На территории комплекса будут размещены: баннеры, растяжки и другие рекламные конструкции.

⊡ Здания, выполненные в форме гигантских запчастей, будут иметь съемные рекламные конструкции.

Прибыль с рекламы от 400 000 руб. в месяц.

Годовая прибыль от 4 800 000 руб.

Уникальность проекта

Комплекс выполнен в виде гигантских автозапчастей. Такое решение дизайна комплекса привлечет в город много гостей. А так как аналогов в мире не существует, тогда этот проект может войти в книгу рекордов Гиннеса.

На территории комплекса разместиться (рис. 4) скейт-парк, магазин всего необходимого для катания и др.

«Гостиничный комплекс » привлечет в город много иногородних жителей, следовательно, возможна потребность в своем (рис. 3) гостиничном комплексе.

Это расширит круг постоянных клиентов комплекса.

⊡ Проект предполагает большой поток автомобилей, следовательно, возможна потребность в АЗС на территории комплекса или неподалеку.

Рис. 3. Место расположения комплекса

Рис. 4. Разновидность гоночногокольца

Существует несколько вариантов схематичного исполнения трека на местности (рис. 5 и рис. 6).

Рис. 5. Схематичный вариант трека на местности

Рис. 6. Нестандартный вариант трека на местности

Вложения

- ⊡ Выделение земли под строительство комплекса – бесплатно.
- ⊡ Постройка гоночного трека.
- ⊡ Затраты на постройку зданий.
- ⊡ Покупка необходимого оборудования для всего комплекса.
- ⊡ Заработная плата организаторам проекта.

С помощью гоночного трека будет создан новый бренд, под которым будут работать автокомплексы в городах области.

Основные потребители продукции

Автовладельцы, автолюбители, любители автосоревнований.

Территория запуска проекта: Челябинская область, Миасс-Челябинск.

Экономические показатели проекта

Необходимые инвестиции: от 550 млн рублей.

Годовая прибыль: примерно 93 млн рублей.

Срок окупаемости: примерно 7 лет.

Преимущества проекта

Проект будет способствовать развитию автоспорта и автокультуры. Новые рабочие места. Для автовладельцев – удобство всех услуг в одном месте. Проект будет приносить большую прибыль Миасскому городскому округу и Челябинской области.

Библиографический список

1. www.avtovesty.ru
2. Дубровский, Д.А. Открываем автосервис: с чего начать, как преуспеть. – СПБ.: Питер, 2011. – 256 с.
3. Справочник по диагностике неисправностей автомобиля. – М.: Технарь. 2011. – 693 с.
4. Арзамаскина, Н. Маленький аспект большого Интернета / Н. Арзамаскина // АБС. Автомобиль и сервис. –2000. – № 8. – С. 42–13.
5. Цветкова, В.И. Основные факторы и тенденции развития рынка автосервиса / В.И. Цветкова // Экономика и менеджмент на транспорте. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГИЭУ, 2005. – Вып. 4. – 0,25 п.л.

УДК 629.114.3

ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ И СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ АВТОПОЕЗДОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПРИЦЕПА

В.В. Краснокутский

В статье рассматривается повышение проходимости тягача с активным прицепом, снижение энергетических затрат, а также снижение воздействия ходовым аппаратом на опорную поверхность используя рациональное распределение мощности двигателя между тягачом и активным прицепом путем изменения кинематического рассогласования в приводе ведущих колес оцениваемое по минимальным затратам мощности на буксование.

Ключевые слова: рациональное распределение мощности, буксование, рассогласование в приводе, активный прицеп, полноприводные автопоезда.

Увеличение выпуска автотранспорта и улучшение их эксплуатационных свойств, приводят к повышению мощности двигателя. В свою очередь возникает проблема реализации установленной мощности двигателя через ходовой аппарат в тяжелых дорожных условиях в связи с недостаточных тягово-сцепных характеристик.

Одним из путей такой реализации является передача мощности двигателя активному прицепу снабженного приводом ходовых колес с бесступенчатым изменением передаточного отношения. Применение полноприводных автопоездов в тяжелых дорожных условиях – приводит к снижению энергетических затрат на перевозку грузов. Рассмотрим, с чем это связано.

Рациональное кинематическое рассогласование в приводе исключает циркуляцию мощности между тягачом и прицепом, что значительно снижает буксование и расход топлива, повышается производительность, используется сцепная масса груза. Такое энергетическое средство снижает механические воздействия на почву, что особенно актуально в период уборочных работ в сельском хозяйстве и сохранения верхнего растительного покрова районов дальнего севера.

Механическое воздействие движителей на почву не может рассматриваться только как уплотняющее, так как одновременно с этим происходит разрушение структуры почвы под влиянием буксования. Можно выделить три направления этой проблемы: технологическое, агрономическое и конструкторское. Конструкторское направление является эффективным средством решения проблемы, поскольку относительно легче и дешевле предотвратить механическое воздействие движителей на почву, чем затем устранять его последствия.

Экспериментальные исследования были проведены автором статьи на тракторном транспортном агрегате, в качестве тягача использовался трактор класса 14 кН и активный прицеп грузоподъемностью 6 т, позволяющий менять кинематическое рассогласование между движителями трактора и активным прицепом. Такая конструкция тягача и прицепа с ведущим задним мостом дает возможность поддерживать активные мосты в ведущем режиме. Так как активные мосты соединены между собой жесткой связью, в чисто ведущем режиме работать могут только в идеальном случае. При нарушении равенства радиусов колес (например, вследствие деформации пневматической шины) или условий качения одного из мостов возникает кинематическое рассогласование привода, которое вызывает нарушение ведущего режима одного из мостов. В этом случае один мост будет работать с пробуксовыванием (толкающий), а другой (отстающий) с проскальзыванием [3, 4].

Устранить в какой-то мере данный недостаток можно постоянной корректировкой кинематического рассогласования в приводе ведущих мостов. Рациональное кинематическое рассогласование будет оптимальным при минимальных затратах мощности на буксование $N_{\delta B}$.

В статье представлены результаты исследований затрат мощности двигателя при движении тягача с активным прицепом по мягкому сминаемому грунту (пашня). Движение осуществлялось по горизонтальному участку. Замеры производились при условии установившегося движения, без учета сил сопротивления воздуха (вследствие малой скорости движения).

Так как мощность двигателя равна сумме мощностей, затрачиваемых на преодоление различных сопротивлений, возникших при движении, уравнение мощностного баланса определяется выражением

$$N_{ee} = N_т + N_{\delta B} + N_f, \quad (1)$$

где $N_т$ – потери мощности в трансмиссии; N_δ – мощность, затрачиваемая на буксование ведущих колес; N_f – мощность, затрачиваемая на преодоления сил сопротивления качению колес.

Условие равенства поступательных скоростей движения ведущих мостов тягача и активного прицепа имеет вид [1, 2]

$$V_m (1 - \delta_m) = V_n (1 - \delta_n) = V_p, \quad (2)$$

где V_m – теоретическая окружная скорость колес тягача; V_n – теоретическая окружная скорость колес активного прицепа; V_p – рабочая скорость движения энергосредства; δ_m, δ_n – буксование колес тягача и прицепа соответственно.

С целью удобства дальнейшего анализа введем понятие коэффициента кинематического рассогласования в приводе движителей тягача и активного прицепа, которым будем называть соотношение:

$$K_v = \frac{V_п}{V_т} = \frac{1 - \delta_т}{1 - \delta_п}. \quad (3)$$

В таком случае между буксованием забегающих колес появляется зависимость, которая на основании уравнения (2) выражается соотношением

$$\delta_m = 1 - K_v (1 - \delta_n). \quad (4)$$

Как показывает анализ экспериментальных и теоретических данных, взаимосвязь коэффициента использования сцепного веса и буксования с достаточной для практического анализа точностью может быть описана полиномом второго порядка:

$$\delta_m = a_m \varphi_m + b_m \varphi^2_m; \quad (5)$$

$$\delta_n = a_n \varphi_n + b_n \varphi^2_n, \quad (6)$$

где a_m , a_n и b_m и b_n – постоянные коэффициенты, зависящие от типа и конструкции движителей и свойств опорной поверхности; φ_m , φ_n – коэффициенты использования сцепного веса тягача и прицепа соответственно;

$$\varphi = \frac{P_к}{G_c}, \quad (7)$$

где $P_к$ – касательная сила тяги тягача (прицепа); G_c – сцепной вес тягача (прицепа).

Сцепной вес колесных тягачей или активных прицепов с одной ведущей осью (для данного эксперимента) можно найти по выражению [1, 2];

$$G_c = \frac{G(L - C) + M_o}{L}, \quad (8)$$

где L – продольная база тягача (прицепа); G – эксплуатационный вес тягача (прицепа); C – расстояние от центра тяжести тягача (прицепа) до вертикальной плоскости, проходящей через геометрическую ось качения ведущих колес; M_o – крутящий момент на ведущих колесах тягача (прицепа) $M_o = P_к r_к$, где $r_к$ – динамический радиус ведущего колеса тягача (прицепа).

С учетом изложенного зависимости (5), (6) окончательно можно записать в следующем виде:

$$\delta_m = \frac{a_т P_{кт} L_т}{G_m (L_m - C_m) + P_{км} r_{км}} + b_m \left(\frac{P_{кт} L_т}{G_m (L_m - C_m) + P_{кт} r_{кт}} \right)^2;$$

$$\delta_п = \frac{a_п P_{кп} L_п}{G_п (L_п - C_п) + P_{кп} r_{кп}} + b_п \left(\frac{P_{кп} L_п}{G_п (L_п - C_п) + P_{кп} r_{кп}} \right)^2.$$

Затраты мощности на буксование ведущих колес энергетического средства состоящего из тягача и активного прицепа

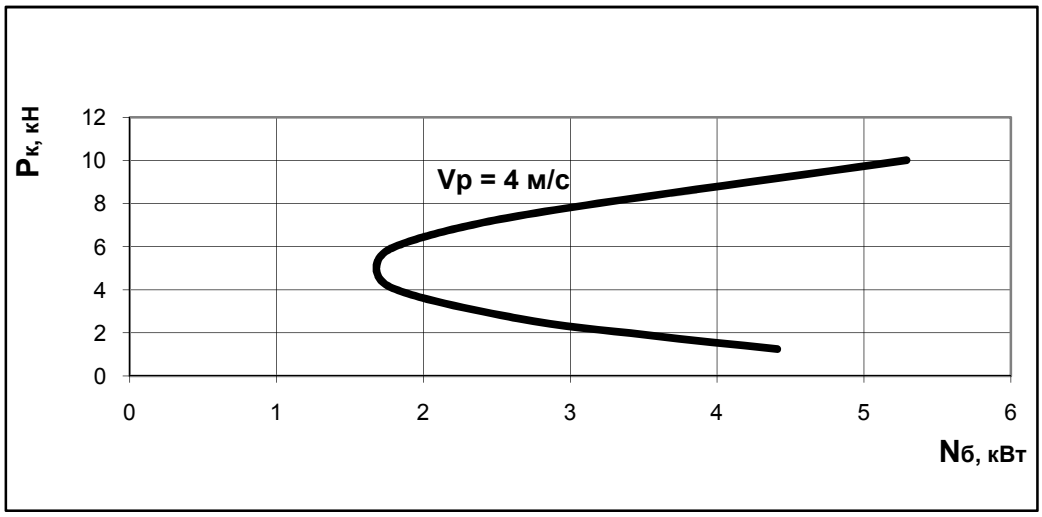
$$N_\delta = N_{\delta m} + N_{\delta п}, \quad (9)$$

где $N_{\delta m} = P_{км} V_m \delta_m$ – затраты мощности на буксование ведущих колес тягача; $N_{\delta п} = P_{кп} V_п \delta_п \delta_m$ – затраты мощности на буксование ведущих колес прицепа, или с учетом (2),

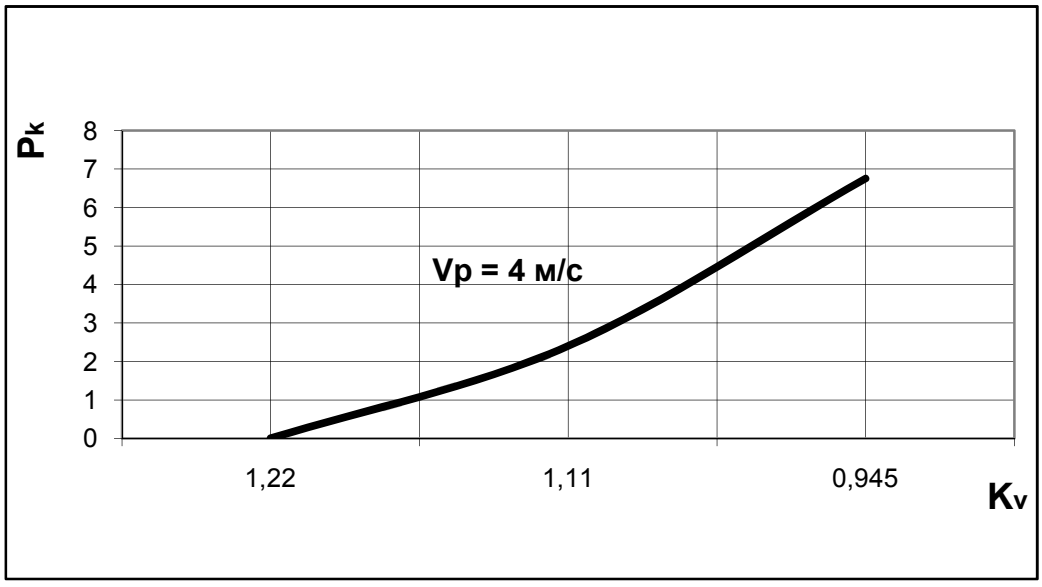
$$N_{\delta m} = P_{км} V_p \delta_m / (1 - \delta_m);$$

$$N_{\delta п} = P_{кп} V_p \delta_п / (1 - \delta_п). \quad (10)$$

Анализ полученной зависимости затрат мощности на буксование имеет ярко выраженный экстремум (min), приходящейся на режим работы энергетического средства с рациональным значением $К_v$ (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1: а – затраты мощности на буксование при изменении касательной силы тяги; б – зависимость касательной силы тяги при изменении рассогласования в приводе прицепа

Необходимо отметить, что на положение экстремума функции влияет масса перевозимого груза, скорость движения энергетического средства и опорная поверхность. Таким образом, использование энергетического средства с оптимально меняющимся кинематическим рассогласованием в приводе ведущих мостов приводит к значительному снижению буксова-

ния, а следовательно, повышению проходимости, снижению энергетических затрат которые затрачивались на расход топлива, износ ходовой системы и вредного воздействия на почву (перетирание). Полученные данные показывают о целесообразности применения таких энергетических средств и исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Тракторы: теория: учеб. для студентов вузов по специальности «Автомобили и тракторы» / В.В. Гуськов, Ю.Е. Валеев, Ю.Е. Атаманов и др. – М.: Машиностроение, 1985.

2. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников и др. – М.: Агропромиздат, 1986.

3. Старцев, А.В. Затраты мощности на движение полноприводного тракторного транспортного агрегата по твердой опорной поверхности / А.В. Старцев, В.В. Краснокутский // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1997. – № 19.

4. Старцев, А.В. Затраты мощности на движение полноприводного тракторного транспортного агрегата по сминаемой опорной поверхности / А.В. Старцев, В.В. Краснокутский, В.Н. Кычев // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 1997. – № 19.

5. Пособие по эксплуатации машино-тракторного парка / Н.Э. Фере, В.З. Бубнов, А.В. Еленев и др. – М.: Колос, 1977.

УДК 378.147.88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИН ПО МЕТРОЛОГИИ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ

Е.Н. Слесарев

Проанализированы проблемы и перспективы развития высшего образования, выявлена необходимость и неотрывность образования от информационных технологий. Предложены конкретные мероприятия по развитию этих технологий в образовательном процессе, рассмотрены примеры их применения на факультете.

Ключевые слова: информационные технологии, высшее образование, метрология, управление качеством.

Развитие современного образования не представляется возможным в отрыве от современных технологий, коими в настоящее время являются информационно-компьютерные технологии. Компьютерная техника, появившись в середине XX века, всего за несколько десятилетий совершила настолько огромный скачок в своем развитии, что современный специалист практически любой сферы деятельности уже не представляет себе возможность осуществлять свою работу без применения компьютерной техники и информационных технологий. Не может в стороне от генеральной линии развития научно-технического процесса оставаться и высшее образование [1]. Тому есть, по меньшей мере, две причины: во-первых, мы готовим специалистов, которые по роду своей будущей деятельности должны будут работать с использованием современных информационных технологий; и, во-вторых, осуществлять их подготовку с использованием в образовательном процессе этих же самых информационных технологий можно не только качественнее, но и проще как для преподавателей, так и для студентов.

Для достижения успеха в XXI веке уже недостаточно только академических знаний и умения критически мыслить, кроме того требуется достаточный уровень информационно-технической квалификации. Поэтому многие студенты стремятся заранее получить навыки в области информационных технологий и обеспечить себе этим более успешную карьеру.

Современная социально-экономическая тенденция, характерна тем, что все большее число и все большая доля рабочих мест и видов деятельности требуют знаний и квалификации высокого уровня, и, чтобы успешно трудиться на этих местах и в этих сферах деятельности, необходимо соответствующее образование. Причем, это характерно не только для тех видов деятельности человека, которые формируются в результате развития современных технологий, но и для специальностей, которые до недавнего

времени предполагали более низкую квалификацию и формально не требуют высшего образования. Таким образом, в настоящее время спрос в обществе на образование характеризуется тенденцией к постоянному росту по мере того, как растет роль научных знаний в жизнедеятельности человека. По мере приобретения образованием характера непрерывного процесса становится все более разнообразным и возрастной состав учащихся, и исходный уровень их знаний, и характер мотивации учения, и содержание потребных знаний. Технологии, используемые для связи учащихся с сообществами и друг с другом, могут сделать процесс обучения более интересным, отвечающим реалиям сегодняшнего дня, предоставляя нужную информацию в нужное время. Этот процесс во многом определяется ранее полученными знаниями, ожиданиями и получаемыми результатами, которые формируют среду обучения.

Практика свидетельствует о том, что применение современных компьютерных технологий при чтении любой дисциплины значительно повышает интерес студентов к предмету исследования и улучшает восприятие изучаемого материала. Кафедра «Управление качеством и сертификация» читает ряд специальных дисциплин по метрологии, стандартизации, сертификации и управлению качеством [2]. Требования к выпускаемому нами специалисту в этой области со стороны работодателей не могут не включать в себя знания современных информационно-компьютерных технологий. Поэтому наша кафедра «Управление качеством и сертификация» активно использует информационные технологии в образовательном процессе по нескольким направлениям.

На факультете имеется файловый сервер [3], доступ к которому имеют все студенты и преподаватели факультета. На этом сервере преподаватели кафедры выкладывают всю имеющуюся у них полезную для студентов информацию: конспекты лекций, учебные пособия по предметам, вопросы для самостоятельной подготовки, методические пособия и задания для самостоятельной работы, а также ссылки на полезные интернет-ресурсы.

С другой стороны при проведении лабораторных и практических занятий по вышеозначенным дисциплинам также активно используются современные информационные технологии. Так кафедра имеет современный компьютеризированный комплекс на полтора десятка лабораторных работ по метрологии, стандартизации, сертификации и управлению качеством. Благодаря этому комплексу имеется возможность готовить специалистов работать на современном оборудовании по определению размеров, шероховатости и отклонению формы контролируемых деталей, которым располагают лишь самые передовые предприятия нашего региона. То есть готовить специалистов, отвечающих самым высоким требованиям работодателей.

В то же время, при выполнении заданий самостоятельной работы по вышеозначенным дисциплинам студентами также активно используются современные информационные технологии в виде компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения для статистической обработки достаточно большого объема данных (пакет статистической обработки MS Excel, макрос-дополнение XLSTAT-Pro, Statistica и др.).

Нужно отметить, что использование информационных и коммуникационных технологий в высшем образовании, как правило, сводится к двум основным направлениям. Первое заключается в применении широких возможностей этих технологий для повышения доступности образования. Необходимо помнить, что чрезмерное увлечение такой дистанционной формой обучения может привести к тому, что будущие студенты могут быть лишены всего того, что требуется для получения подлинно качественного высшего образования: работа в лабораториях, доступ к научным библиотекам, общение с преподавателями и студентами на семинарах и в неофициальной обстановке.

Второе направление предполагает использование информационных технологий для изменения содержания и способов обучения в рамках традиционной очной формы. Но здесь возникает другая проблема, связанная с тем, что внедрение передовых технологий часто создаёт дополнительные преимущества наиболее активным и способным студентам, не влияя на уровень подготовки основного контингента. Нельзя оставить без внимания и возрастающую роль ответственности самого обучаемого за результаты обучения.

Таким образом, использование информационных технологий позволяет сделать образование более доступным с предположением возможных потерь в качестве или повысить качество образования, но для ограниченного, наиболее подготовленного контингента обучаемых.

Библиографический список

1. Портал: Информационно-коммуникационные технологии в образовании. – http://www.ict.edu.ru

2. Слесарев, Е.Н. Краткий обзор развития менеджмента качества / Е.Н. Слесарев // Качество продукции, технологий и образования: материалы III науч.-практ. конф. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2008. – С. 82–86.

3. Сайт филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе. – http://www.miass.susu.ac.ru

ФИЛИАЛ В Г. САТКЕ

УДК 66.043.1 + 669.71.043.1

ТЕХНОЛОГИЯ ШПИНЕЛЬПЕРИКЛАЗОВОГО МАТЕРИАЛА И ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛЬНЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ВТОРИЧНОГО АЛЮМИНИЯ

Т.В. Баяндина, М.А. Баяндина

Исследованы отходы производства вторичного алюминия, изучены процессы при нагревании и минералообразование при введении в состав отходов тонкомолотых периклазовых порошков. Показано, что отходы производства вторичного алюминия можно использовать как сырье для синтеза шпинельпериклазового материала. Выпущена опытная партия шпинельпериклазового материала на основе отходов производства вторичного алюминия и каустического магнезита.

Ключевые слова: отходы производства вторичного алюминия, спеченный периклаз, плавленый периклаз, каустический магнезит, шпинельпериклазовый материал, периклазошпинельный огнеупор.

В последнее время во многих странах проводятся исследования по использованию техногенных отходов и комплексной переработке сырья. Такая тенденция обусловлена истощением природных ресурсов и ухудшением экологической обстановки в промышленных регионах. Для решения проблемы утилизации этих отходов требуется комплексный подход: необходимы теоретические и практические разработки и предложения, которые позволят использовать техногенные продукты предприятий как ценное сырье для получения продукции в различных отраслях промышленности.

Существует большое количество технологий переработки отходов [1–2]. Вместе с тем отходы производства вторичного алюминия (ОПВА) не используют для получения полезных продуктов, несмотря на ряд научно-исследовательских работ, результаты которых указывают на принципиальную возможность такого решения [3].

В настоящее время ОПВА складируют в отвалы. Это наносит экологический вред окружающей среде и экономический ущерб народному хозяйству России за счет потерь ценного минерального сырья.

ОПВА являются достаточно ценным сырьем, так как содержат большое количество оксида алюминия. Содержание Al_2O_3 в ОПВА достигает 60 % (мас.). Кроме оксида алюминия, в состав этих отходов входят в значительных количествах соединения щелочных металлов, удаление которых

является сложной технологической проблемой, и которая до сегодняшнего дня полностью не решена.

К настоящему времени известны лишь несколько способов утилизации ОПВА. Это частичная замена природных бокситов в производстве глиноземистого цемента, использование порошка ОПВА в качестве комплексной добавки при производстве ячеистого бетона и получение алюмосодержащего коагулянта, используемого при фильтрации иловых осадков городских сточных вод.

Таким образом, ОПВА представляют определенный практический интерес как источник сырья для некоторых отраслей промышленности. Одним из перспективных методов утилизации ОПВА является использование их для получения шпинельпериклазового материала.

Химический состав отходов производства вторичного алюминия представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав отходов производства вторичного алюминия

Массовая доля компонентов, %									
$Al_{мет}$	AlN	MeCl*	Me_2O**	Al_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	Fe_2O_3	п.п.п.
1,55	2,64	9,67	6,92	45,04	11,46	7,6	3,15	1,44	10,53

* NaCl + KCl; ** $Na_2O + K_2O$.

В качестве сырья для синтеза шпинельпериклазового материала применяли спеченный периклаз, плавленый периклаз, каустический магнезит и отходы производства вторичного алюминия. Выбор обусловлен различным содержанием оксида магния, размерами кристаллов периклаза и технологией их производства.

Химический состав периклазовых порошков представлен в табл. 2. Все материалы использовали в тонкомолотом виде, содержание зерен размером менее 0,063 мм в них не менее 95 %.

В результате исследований было установлено, что независимо от природы периклазового порошка ОПВА ведет себя во всех шихтах практически одинаково.

При обжиге ОПВА с периклазовым порошком протекают следующие процессы.

1. При температуре 900 °С начинается образование алюмомагнезиальной шпинели.

2. В интервале температур 900–1300 °С отмечается полное удаление хлоридов щелочных металлов.

3. Основное количество шпинели образуется в интервале температур 1300–1680 °С.

4. Процесс шпинелеобразования заканчивается при 1680 °С.

Полученные данные были использованы для оценки влияния природы периклазовых порошков на основные показатели свойств синтезированного шпинельпериклазового материала. Природа периклазового порошка дает незначительные различия в физико-механических свойствах образцов.

Таблица 2

Химический состав периклазовых порошков

Материал	Массовая доля компонентов, %					
	п.п.п.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
Спеченный периклаз	0,72	2,50	0,32	1,21	2,10	93,15
Плавленый периклаз	0,50	1,08	0,27	1,56	2,86	93,73
Каустический магнезит	7,16	0,62	0,24	1,13	1,75	89,10

Минеральный состав обожженных образцов однотипен независимо от содержания ОПВА в составе шихт и природы периклазового порошка, но несколько различается температурным интервалом и количественным соотношением фаз. Различия вызваны разным содержанием ОПВА и температурой обжига.

С увеличением содержания MgO в составах обожженных образцов и с ростом температуры несколько уменьшаются размеры кристаллов шпинели и увеличиваются размеры кристаллов периклаза. Так в образце 1, обожженном при температуре 1580 °С, размер кристаллов шпинели составляет 20 мкм, периклаза – 40 мкм. В образце 5 зерна шпинели достигают лишь 10 мкм, а периклаза – 60 мкм. При температуре 1750 °С размер кристаллов шпинели в образце 1 достигает 40 мкм, а в составе 5–50 мкм и то в виде пленок между зернами периклаза; размер кристаллов периклаза в образце 1 достигает 55 мкм, а в образце 5–120 мкм.

В составах с высоким содержанием ОПВА наблюдается большее количество силикатов, чем в составах с незначительным содержанием пылевидных отходов производства вторичного алюминия.

Таким образом, с точки зрения экономической целесообразности шпинельпериклазовый материал лучше синтезировать на основе каустического магнезита.

Шпинельпериклазовый материал получали методом твердофазного синтеза, поэтому были определены рациональные параметры синтеза шпинельпериклазового материала. Брикеты для синтеза шпинельпериклазового материала необходимо формовать при давлении прессования не менее 50 МПа и формовочной влажности не более 6 % (мас.). Для завершения процесса шпинелеобразования сформованные брикеты необходимо обжигать при температуре 1680–1750 °С с выдержкой не менее 5 часов. Шихта для синтеза шпинельпериклазового материала должна содержать 49,5 % (мас.) ОПВА и 50,5 % (мас.) каустического магнезита.

Технология шпинельпериклазового материала была опробована в производственных условиях. Объем опытно-промышленной партии шпинельпериклазового материала составил 2 т.

На основе шпинельпериклазового материала была выпущена опытная партия периклазошпинельных огнеупоров в количестве 1 т. Шихта для производства периклазошпинельных изделий должна иметь следующий состав, % (мас.): спеченный периклазовый порошок фракции 3–0,5 мм – 23 ± 3 и фракции 1–0 мм – 23 ± 3; синтезированный шпинельпериклазовый порошок фракции 0,5–0 мм – 27 ± 3, тонкомолотый спеченный периклаз фракции менее 0, 063 мм – 27 ± 3. Содержание шпинельпериклазового порошкав шихте для производства периклазошпинельных изделий должно составлять27 ± 3 % (мас.), что обеспечивает содержание оксида алюминия в изделиях в пределах 7–14 % (мас.). Обжигать периклазошпинельные изделия, содержащие в своем составе синтезированный шпинельпериклазовый материал, необходимо при температуре 1680 °С.

Свойства опытных периклазошпинельных изделий: открытая пористость 14,6 %, кажущаяся плотность 3,01 г/см^3, предел прочности при сжатии до 77 МПа, температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа 1590 °С, термостойкость (1300 °С – вода) 6–7 теплосмен, дополнительная линейная усадка 0,2 %.

Таким образом, опытные периклазошпинельные изделия удовлетворяют требованиям ТУ 1579–006–00190495–98 «Изделия огнеупорные периклазошпинельные с применением плавленого шпинельсодержащего материала».

Библиографический список

1. Саркисов, П.Д. Отходы различных производств – сырье для получения строительных материалов / П.Д. Саркисов // Экология и промышленность России. – 2001. – № 3. – С. 4–7.

2. Отходы металлургической промышленности – сырье для производства огнеупоров / Т.В. Чусовитина, И.И. Овчинников, Н.А. Сизова и др. // Огнеупоры. – 1992. – № 2. – С. 23–25.

3. Спасибожко, В.В. Основы безотходной технологии / В.В. Спасибожко. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – 132 с.

УДК 666.76(470.55) + 666.32(470.55)

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ДООБЖИГОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ САТКИНСКОГО РАЙОНА

Т.В. Баяндина, М.А. Баяндина

Изучены химический, гранулометрический и минералогический составы, а также дообжиговые свойства глинистого сырья Саткинского района.

Ключевые слова: глинистое сырье, монтмориллонит, гидрослюда, кварц, пластичность, коэффициент чувствительности к сушке, связующая способность.

Кирпичное домостроение, практически вытесненное в СССР и 50-е годы прошлого века железебетоном, переживает второе рождение. Строительный кирпич в наши дни остается самым удобным изделием по сравнению с любым другим строительным материалом, а с точки зрения охраны окружающей среды – экологичным и легко использующимся повторно [1].

Исходным сырьем для изготовления строительного кирпича является глинистое сырье.

Земля Саткинского района богата полезными ископаемыми, такими как магнезитом, доломитом, сидеритом, мрамором, кварцитами и строительными глинами. Запасы строительных глин в Саткинском районе велики, но месторождения на сегодняшний день не разрабатываются, хотя до 70-х годов прошлого столетия, например, глина Карагайского месторождения, использовалась в производстве строительного кирпича [2]. Следовательно, глинистое сырье Саткинского района может быть вовлечено в производство строительной керамики, но для этого необходимо изучить вещественный состав и дообжиговые керамические свойства.

Объектом исследований явились пробы глинистого сырья Айского месторождений. Химический состав исследуемого сырья приведен в табл. 1.

Таблица 1

Усредненный химический состав глинистого сырья Айского месторождения

Содержание оксидов в составе, % (мас.)								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	$\Delta m_{прк}$
68,17	14,29	6,81	2,36	1,87	0,63	0,20	0,77	5,90

Из табл. 1 видно, что глинистое сырье Айского месторождения содержит значительное количество красящего оксида железа, что обеспечивает красную окраску черепка при обжиге. По содержанию Al_2O_3 в прокаленном состоянии в соответствии с ГОСТ 9169–75 пробы Айского месторож-

дений относятся к кислым глинам, пригодные для изготовления строительного кирпича.

По количеству включений глинистое сырье относится к сырью с низким содержанием включений. По размеру включений глинистое сырье классифицируется как сырье с мелкими включениями, преобладают кварцевые включения.

По содержанию фракции размером менее 1 мкм Айское глинистое сырье является грубодисперсным (табл. 2)

Таблица 2

Гранулометрический состав глинистого сырья

Содержание, % (мас.), фракций, мм				
1–0,25	0,25–0,06	0,06−0,01	0,01−0,005	0,005–0,001
19,7	32,6	28,5	6,3	12,9

По гранулометрическому составу в соответствии с диаграммой В.В. Охотина глинистое сырье Айского месторождения относится к суглинкам.

Минералогический состав исследуемого глинистого сырья определялся с помощью рентгенофазового и дифференциально-термического анализов.

Основными процессами, происходящими при нагревании пробы глинистого сырья Айского месторождения являются: удаление адсорбционной воды, включая межслоевую воду гидрослюды и монтмориллонита (40–200 °С); выгорание органических соединений (200–400 °С); удаление кристаллизационной воды монтмориллонита и гидрослюды (400–600 °С); полиморфное превращение низкотемпературного кварца в высокотемпературный (580 °С); разрушение или деформация кристаллической структуры глинистых минералов не зафиксирована ДСК, но в интервале температур 800–1100 °С наблюдается экзотермический эффект с температурой 910 °С, что характерно для кристаллизации аморфных продуктов распада глинистых минералов. Потери при прокаливании составили 5,24 %.

По данным рентгенофазового анализа основными минералами исследуемого глинистого сырья являются кварц, полевые шпаты, рутил монтмориллонит и гидрослюда.

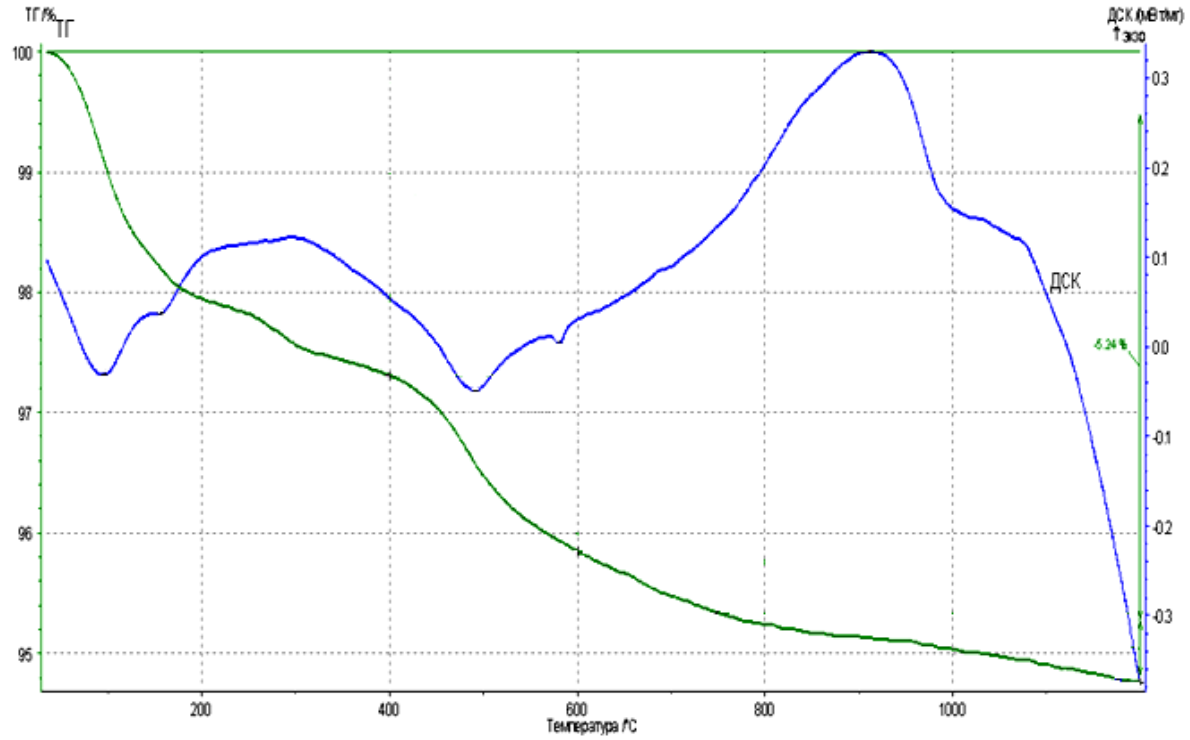
Монтмориллонит – основной породообразующий минерал, в усредненной пробе исследуемого сырья хорошо диагностируется по первому интенсивному базальному рефлексу 15,20 нм (2θ: 5,8096 °).

Гидрослюда – это второй глинообразующий минерал, присутствующий в исследуемом сырье. Диагностируется характерными линиями 9,97, 4,99, 3,310 нм (2θ, °: 8,8622; 17,7599; 26,7409).

Кварц благодаря своей совершенной структуре имеет самые четкие базальные линии 3,3439, 4,2557, 2,4570 нм (2θ, °: 26,6361; 20,8560; 36,11).

В качестве примесей обнаружено наличие рутила и альбита (полевой шпат).

Таким образом, исследуемое глинистое сырье Саткинского района является полиминеральным сырьем.



ДСК-кривая исследуемого глинистого сырья

Глинистое сырье Айского месторождения обладает следующими дообжиговыми свойствами: число пластичности – 10,2; коэффициент чувствительности к сушке 1,17 (по методу Чижского); воздушная усадка – 4,2 %; связующая способность – 7,1 МПа.

Проведенные исследования позволили оценить вещественный состав и дообжиговые свойства глинистого сырья Айского месторождения. Это позволит в дальнейшем разработать технологию производства строительного кирпича.

Библиографический список

1. Гончаров, Ю.И. Состояние и перспективы развития строительного материаловедения в России / Ю.И. Гончаров, А.М. Гридчин, В.С. Лесовик // Современные проблемы строительного материаловедения: тр. 7-х академ. чтений РААСН. – Белгород. – 2001. – Ч. 1. – С. 86−93.

2. Геология и полезные ископаемые Саткинского района. http://www.satka.ru/satka5/visit/index.php?module=card&dep=oraione&content=8 (дата обращения: 18.02.2012).

УДК 624.131.524

ВЛИЯНИЕ НАБУХАНИЯ ТЕКТОНИТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

А.Б. Марков

Многие рудные месторождения залегают в скальных породах, которые обычно разбиты системами трещин самого разного генезиса, в том числе и тектонического характера. Трещины выполнены раздробленным материалом – тектонитом. Наиболее опасными для устойчивости горных сооружений является глинистый материал. При замачивании водой глина набухает, возникает довольно значительное давление набухания, которое способствует сдвижению скальных массивов в горные выработки.

Ключевые слова: месторождения полезных ископаемых, устойчивость массивов, тектониты, давление набухания.

Скальные горные массивы, являющиеся средой для ведения горных работ, обычно не являются монолитными. Они нарушены целой системой зон ослабления, среди которых существенное место занимают тектонические нарушения. По тектоническим трещинам и разломам возникают смещения различных по объёму горных масс в карьерах, сдвижения пород в тоннелях и подземных горных выработках, фильтрация воды из водохранилищ, разрушение плотин и другие инженерно-геологические процессы и явления.

Тектонические нарушения могут быть выполнены различным по составу веществом, при этом наибольшую опасность для устойчивости горных массивов представляет глинисто-обломочный заполнитель, называемый тектонитом. Тектониты в процессе своего развития не являются постоянными, неизменными, а подвергаются вторичным преобразованиям, связанным с воздействием на них как гидротермальных растворов, так и грунтовых вод и разнообразных агентов выветривания. Степень этих изменений зависит от геологических условий развития территории и, в какой-то степени, от климатических особенностей, существующих в регионе.

Свойства несцементированных и слабо сцементированных тектонитов в большей степени определяются гранулометрическим составом и минеральными особенностями раздробленного материала. По содержанию глинистого материала выделяется 4 группы: группа А – свыше 50 % пелитовой фракции, группа Б – от 30 до 50 %, группа В – от 15 до 30 %, группа Г – менее 15 %. Среди минеральных разновидностей устанавливаются хлорит-гидрослюдистая, монтмориллонитовая, агрегатная, обломочная и другие разновидности.

Одним из основных инженерно-геологических показателей, используемых для оценки водопрочности горных пород, считается способность их к набуханию. Тектониты, являясь глинисто-обломочными образованиями, при увлажнении обычно в той или иной степени набухают. Но, в отличии от осадочных пород, этот процесс набухания происходит в ограниченном пространстве, определяемом мощностью зоны дробления. Выход избыточного материала, неизбежно возникающего при увеличении объёма пород, происходит только в сторону открытой части трещин, то есть на сравнительно небольшом и вытянутом участке разлома. При вскрытии тектонического нарушения подземной горной выработкой, особенно на рудных месторождениях, когда выработки часто проходят по зонам дробления, могут происходить значительные вывалы материала. Этим процессом охватывается не только заполнитель трещин, но и вмещающие горные породы.

При падении тектонического нарушения с глинисто-обломочным заполнителем в сторону выемки и ориентировке его параллельно склону (естественному или искусственному) или под небольшим углом к нему, могут возникать довольно значительные смещения горных масс. Развивающееся под действием увлажнения давление набухания способствует отрыву значительных по площади участков поверхности склона или откоса.

Наибольшим набуханием из исследованных проб обладают образцы тектонитов из эффузивных пород, что вызвано наличием в глинистой фракции монтмориллонита. Самыми набухающими, независимо от своего минерального состава, являются наиболее тонкодисперсные тектониты категории А. Влажность набухания их в среднем достигает 45–46 %, величина набухания – 45 %, давление набухания – 0,5–1,0 МПа.

При сокращении глинистой фракции и покрупнением материала происходит значительное уменьшение степени набухаемости тектонитов. Эта зависимость не носит чёткого характера. Можно говорить только об общей её направленности: происходит общее уменьшение набухаемости пород от дисперсных тектонитов к грубообломочным.

Слабее всего набухают тектониты из кристаллических сланцев и кварцитов, так как они содержат сравнительно небольшое количество глинистого продукта, представленного преимущественно слабо набухаемой, часто сцементированной хлорит-гидрослюдистой массой. Обломки же исходных пород сложены практически ненабухающими частицами.

Если сравнивать величины, характеризующие набухаемость тектонитов из различных горных пород, то становится очевидным, что результаты анализов перекрывают друг друга и почти не имеют различия даже по средним величинам. Коэффициенты корреляции часто находятся в пределах выше допустимых норм и, как правило, превышают 30 %. Кроме того, вполне возможно, что могут существовать тектониты, содержащие значительный процент дисперсного материала и в заполнителе трещин из слабо

набухающих даже при дроблении пород – кварцитов, кристаллических сланцев и так далее. Поэтому более удобно изучать набухаемость тектонитов не в зависимости от типа вмещающих горных пород, а в зависимости от гранулометрического и минерального состава самого заполнителя. Выделенные разновидности тектонитов позволяют получить чёткую картину изменения показателей набухания в зависимости от минеральных особенностей заполнителя и размера слагающих его фракций.

Наибольшей влажностью набухания характеризуются тонкодисперсные образования. Влажность набухания тектонитов группы А любых минеральных разновидностей приблизительно одинаковая и превышает 45 %. Значение этого показателя для группы Б находится в пределах от 25 до 45, причём 50 % проб имеют влажность набухания от 30 до 35 %. Для группы В расширяется интервал наибольших значений показателей от 15 до 30 %.

Такое же распределение характерно и для тектонитов группы Г. В группах Б, В и Г влажность набухания уменьшается от хлорит-гидрослюдистой разновидности к агрегатной и далее к обломочной.

Величина набухания тектонитов в общем снижается от хлорит-гидрослюдистых разновидностей к обломочной. Рудные тектониты чаще всего имеют более высокую величину набухания, чем обломочные, что связано с наличием в них свободного дисперсного глинистого вещества.

Наибольшее давление набухания установлено в тектонитах группы А, где оно колеблется от 0,5 до 1,0 МПа. Давление набухания в тектонитах группы Б колеблется, в среднем, от 0,13 до 0,36 МПа, в тектонитах группы В – от 0,05 до 0,25 МПа. Наименьшей величиной давления набухания обладают наименее дисперсные тектониты группы Г: от 0,01 до 0,06 МПа.

При условии набухания всей или значительной части поверхности тектонической трещины развивается весьма существенное давление на горнын породы, что способствует ослаблению прочности всего массива и возникновению оползне-обвальных смещений. Можно привести несколько примеров, характеризующих величину давления, оказываемого заполнителем тектонических трещин на окружающие породы в горных выработках. Так, например, площадь поверхности тектонического нарушения, по которому произошёл один из оползней на Маканском карьере Южного Урала, равна 2800 м^2. Давление набухания заполнителя, отобранного из этого нарушения, достигает 0,12 МПа. Следовательно, при насыщении водой всей площади тектонического нарушения развивающееся давление могло достичь весьма существенной величины, равной 3360 МПа.

Площадь одного из оползней на Бурибаевском карьере Южного Урала равна приблизительно 3500 м^2. Величина давления увлажнённых тектонитов по всей поверхности трещины могла достичь 5250 МПа.

Давление, возникающее при насыщении тектонитов водой, значительно увеличивает напряжённое состояние горного массива, в результате чего

может происходить концентрация напряжений в отдельных участках. Там, где возникают ослабленные зоны, происходит отрыв блока горных пород. роме того, следует учитывать, что насыщение водой тектонического нарушения происходит не по всей площади трещины, а по отдельным её участкам, что создаёт условия для нарушения равновесного состояния горного массива, ограниченного тектоническим нарушением, и может вызывать смещение блоков горных пород. Подобные смещения, вполне вероятно, могут происходить не только в том случае, когда тектоническое нарушение открывается в выработанное пространство, но и тогда, когда оно ориентировано параллельно тли под острым углом к откосу.

Для того чтобы избежать нарушения устойчивости горных массивов, которое может возникнуть при насыщении тектонитов водой, в результате развития давления набухания, следует предупреждать поступление воды в тектоническую трещину. Наиболее действенными мероприятиями следует считать правильно поставленные дренажные работы, экранизацию поверхности разломов водоизолирующим материалом, разгрузку напорных вод, движущихся по трещине и создающих дополнительные напряжения, инъекцию различных веществ, которые могут связать глинистый заполнитель и превратить его в более прочный и слабо набухаемый.

Таким образом, давление набухания оказывает значительное влияние на устойчивость горных выработок, что следует учитывать при проектировании сооружений того или иного плана. Это давление будет увеличиваться по мере возрастания дисперсности заполнителя и с возрастанием в нём доли монтмориллонита. Особенно важно учитывать величину давления набухания при проходке подземных горных выработок, поскольку, в зависимости от гранулометрического и минерального состава тектонитов, может развиваться весьма значительное давление на крепь, выбор которой следует связывать особенностями заполнителя трещин. Например, игнорирование особенностей набухания в одной из шахт Карамазара (Таджикистан) привело к образованию вывала породы. Площадь вывала по трещине составила 12 м^2. Давление на вмещающую породу и на крепление выработки в момент максимального водонасыщения тектонита достигло 66 МПа.

УДК 553.611.9 + 666.32

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМЗИТА ИЗ ГЛИН БАКАЛЬСКИХ РУДНИКОВ

М.В. Маркова

Изложена методика получения керамзита из глин Бакальских месторождений. Приведены данные по прочности, вспучиваемости, водопоглощению и другим свойствам керамзита. Сделан вывод о возможности получения керамзита из отвальных глин.

Ключевые слова: глины, керамзит, вспучиваемость, утилизация.

Керамзит – это лёгкий пористый материал, получаемый при ускоренном обжиге легкоплавких глин. По внешнему виду керамзит напоминает гравий, то есть представляет собой гранулы преимущественно овальной или округлой формы различного размера.

Для приготовления керамического гравия глинистое сырьё первоначально высушивали, измельчали и просеивали через сито с диаметром ячеек 1,0 мм и готовили тесто нормальной формовочной влажности. Из полученной массы формовали гранулы-цилиндры с диаметром и высотой 16 мм.

Приготовленные гранулы-цилиндры провяливали на воздухе при комнатной температуре и высушивали в сушильном шкафу.

Далее в муфельную печь, предварительно разогретую до температуры 200, 300, 400 °С, помещали анализируемые образцы для досушивания. Обжиг гранул проводили при температуре от 990 до 1260 °С с интервалом 30 °С (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент вспучивания глин

Температура, °С		Объём гранул, см^3		Коэффициент вспучивания
термоподготовки	обжига	высушенных	вспученных	
200	990	4,02	3,92	0,97
200	1020	4,10	3,95	0,96
200	1050	3,98	3,80	0,95
200	1080	4,09	3,82	0,93
200	1110	4,07	3,74	0,92
200	1140	4,12	3,68	0,89
200	1150	4,04	3,60	0,89

Способность к вспучиванию сырья оценивается с помощью коэффициента вспучивания, который представляет собой отношение объёма зерна керамзита к объёму сухой гранулы.

Изучаемые глины тугоплавкие, поэтому при обжиге вспучивания образцов не наблюдалось. Происходит процесс их усадки. В результате коэффициент вспучивания оказался не больше, а меньше единицы.

Дальнейшее изучение обжиговых свойств проводилось на гранулах, приготовленных из шихты, содержащей 5 и 10 % древесных опилок (по массе). Обжиг осуществлялся при температуре от 1110 до 1150 °С (табл. 2).

При введении в шихту 5 % органо-минерального компонента (древесных опилок) коэффициент вспучивания превысил значение 2,5. При добавке в шихту 10 % древесных опилок коэффициент вспучивания ещё более возрос. Таким образом, при введении в сырцовую массу древесных опилок происходит увеличение коэффициента вспучивания, то есть создаются условия для получения кондиционного продукта по анализируемому показателю.

Таблица 2

Вспученность материала с добавкой древесных опилок

Температура обжига, °С	Коэффициент вспученности при содержании древесных опилок в шихте в количестве, %	
	5	10
1110	2,54	2,63
1140	2,62	2,77
1150	2,68	2,84

Средняя плотность зёрен керамзита, изготовленного из шихт с содержанием 5 % опилок, составила 1,14 г/см^3, а при содержании 10 % опилок – 0,90 г/см^3. По этому показателю сырьё можно отнести к слабовспучивающемуся.

Уменьшение плотности гранул связано не со вспучивающимися особенностями сырья, а с образованием различного размера пор, которые формируются при сгорании опилок. Следовательно, для получения кондиционного материала, пригодного для изготовления лёгких бетонов, в сырцовую глиняную массу следует вводить выгорающие добавки: древесные опилки, крошку каменного угля, соляровое масло, пирит, то есть различные вещества, дающие при сгорании значительное количество газов. Эти газы не только создают в конечном продукте поры, но и раздвигают минеральные частицы, тем самым способствуя увеличению общей пористости.

Истинная плотность продукта составляет 2,65 г/см^3.

Одним из необходимых параметров, характеризующих пригодность сырья для изготовления керамзита, является насыпная плотность. Насыпная плотность керамзита, приготовленного из шихты, содержащей 5% опилок, составила 0,810 кг/м^3; плотность керамзита, в состав которого входило 10 % древесных опилок, несколько ниже – 0,730 кг/м^3 (обжиг произ-

водился при температуре 1150 °С). По этим показателям материал также относится преимущественно к слабовспучивающимся.

Водопоглощение керамзита из шихты, содержащей 10% опилок, равно 21,2 %, а при 5 % опилок – 19,5 %. Водопоглощение керамзитового гравия при насыщении его в течение одного часа водой не должно превышать 25 %. Полученные результаты вполне вписываются в стандартные условия.

При содержании 10 % опилок в шихте предел прочности керамзитового гравия составил 1,6 МПа. При наличии в шихте 5% опилок величина прочности при сжатии увеличилась до 2,4 МПа. По этим показателям керамзитовый гравий соответствует стандартным условиям.

По техническим условиям для керамзита коэффициент формы зёрен должен быть не более 1,3. Среднее значение коэффициента формы зёрен испытуемого материала равно 1,3 (при колебаниях показателя от 1,1 до 1,6). Такая величина коэффициента формы зёрен соответствует стандартным условиям.

Пористые заполнители должны обеспечивать получение на их основе долговечных лёгких бетонов. Поэтому к ним предъявляют определённые требования по морозостойкости. Количественной мерой морозостойкости является потеря массы после 5 циклов воздействия сернокислого натрия (то есть 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания). В нашем примере образцы практически не изменили массу даже после пяти циклов воздействия сернокислого натрия.

В пористых заполнителях могут содержаться вещества, которые при определённых условиях (в процессе изготовления заполнителя или при его хранении) способны увеличиваться в объёме, что может привести к распаду материала. В связи с этим для заполнителей предусмотрены испытания на стойкость против распада. Для керамзита потеря массы после испытания на известковый распад (в воде) не должен превышать 5 %. Потеря массы анализируемого материала не превысила 2 %.

Таким образом, Бакальские глины могут быть использованы для получения керамзита только при введении в шихту специальных добавок. При обжиге вспучивания материала практически не происходит, поскольку глина тугоплавкая. Уменьшение плотности и увеличение пористости обусловлены образованием пор при сгорании органических веществ, а также раздвиганием частиц минерального вещества образующимися при горении газами. Подобное явление возможно и при разложении вводимого в шихту пирита.

УДК 37.016:530.145 + 530.145

ОБУЧЕНИЕ ВОПРОСАМ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ УЧАЩИХСЯ ПРОФИЛЬНЫХ КЛАССОВ В СОПОСТАВЛЕНИИ И СРАВНЕНИИ С КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКОЙ

О.Ю. Миниахметова

В работе показана методика обучения вопросам квантовой физики учащихся профильных классов в сопоставлении и сравнении с классической механикой. Предлагаемый подход, а именно приём аналогий позволяет установить преемственность в формировании понятий, сравнить известные факты с новыми, раскрыть границы применения законов. Проведено сравнение количества часов на изучение классической и квантовой механики в старшей профильной школе.

Ключевые слова: квантовая физика; обобщающее повторение; собеседование.

Курс физики средней школы построен в соответствии с эволюцией физической картины мира. Сначала учащиеся изучают явления и законы макромира, основу которого составляет механическая картина мира. Движение материального объекта в классической механике задается кинематическими уравнениями и законами И. Ньютона. Зная эти законы можно описать движение объекта и причины изменения движения в настоящем, прошлом и будущем.

Квантовая механика, составляющая базис квантово-полевой картины мира, описывает поведение микрообъекта, обладающего дуальными свойствами. В зависимости от средств наблюдения он может предстать волной или частицей. Понять глубоко свойства микрообъекта ученик сможет, если постоянно проводить аналогии между явлениями и закономерностями имеющим место в макро- и микромире. Если в макромире принцип детерминизма является ведущим, то в квантовой механике принцип неопределенности противоречит основным принципам классической механики.

При изучении основных вопросов квантовой механики ученики испытывают трудности, прежде всего потому, что все процессы невозможно пронаблюдать непосредственно. Подчас ученик должен, для понимания сути квантовых вопросов, привлечь интуицию и даже фантазию. Это не просто, поэтому задача учителя помочь ученику разобраться в сути квантовых закономерностей.

Последний раздел школьного курса физики – «Квантовая физика» открывает большие возможности для развития мышления учащихся в этом разделе широко используются такие приёмы, как сравнение и классификация, обобщение и систематизация. Особенно полезно в конце изучения

раздела «Квантовая физика» провести обобщающее повторение, рассмотрев вопросы квантовой механики в сопоставлении с идеями классической механики; провести аналогию и найти различия между двумя этими фундаментальными физическими теориями. Такой подход позволит лучше усвоить основные закономерности квантовой механики. Тем более что в старшей профильной школе на изучение вопросов классической механики программа Г.Я. Мякишева выделяет 64 часа, в её структуру и содержание включены следующие разделы и темы:

1) кинематика (кинематика точки; кинематика твердого тела);
2) динамика (законы механики Ньютона; силы в механике);
3) законы сохранения в механике (закон сохранения импульса; закон сохранения энергии);
4) статика (равновесие абсолютно твердых тел).

На изучение вопросов современной физики (квантовой) выделяется 40 часов. Автор программы предусматривает изучение следующих разделов:

1) световые кванты;
2) атомная физика;
3) физика атомного ядра;
4) элементарные частицы;
5) значение физики для объяснения мира и развития производительных сил общества.

Сравнение количества часов на изучение классической и квантовой механики в старшей профильной школе (64 и 40) приводит к выводам о возникновении противоречия между сущим и должным. С одной стороны у школьников необходимо формировать современные представления об окружающем мире, с другой стороны, на изучение вопросов нерелятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики образовательная программа по физике выделяет недостаточное количество часов.

Один из приёмов, способствующих повышению эффективности изучения вопросов квантовой механики – приём аналогий связан с её изучением в сопоставлении с классической механикой. Обучение вопросам квантовой физики в сопоставлении с классической физикой позволяет установить преемственность в формировании понятий, сравнить известные факты с новыми, раскрыть границы применения законов. Думаем, что изучение вопросов квантовой механики и классической механики в сопоставлении поможет ученикам глубже понять особенности движения микрообъектов в макро- и микромире.

Квантовую физику изучают в конце школьного курса физики, причем изучают на количественном уровне, с использованием математических уравнений. На протяжении всего школьного курса физики учащиеся практически не встречались с такими фундаментальными понятиями как «дуализм», раскрывающим свойства частиц, вещества и поля, дискретность

энергии, свойства ядра атома и элементарных частиц. Следует отметить, что о строении атома и его ядра школьники получили первоначальные представления в курсе физики основной школы, более полные – в курсе химии.

Для повышения качества усвоения материала очень важно опираться на ранее полученные знания. Перед изучением строения атома целесообразно повторить понятие центростремительного ускорения, законы И. Ньютона, Ш. Кулона, а также те сведения о строении атома, которые учащиеся получили в базовом курсе физики и при изучении химии. Полезно в конце изучения раздела «Квантовая физика» в старшей профильной школе провести обобщающее собеседование, при подготовке к которому ученики проявят больше самостоятельности в суждениях. Они могут решать на таком занятии проблемные вопросы, высказывать свое мнение по тем или иным вопросам, поставленным учителем на обсуждение. Например, в конце изучения курса физики в старшей школе можно провести обобщающее собеседование по теме «Квантово-механические свойства вещества». На собеседование можно вынести следующие вопросы: опишите свойства микрообъекта с точки зрения квантовых представлений; назовите принципы и постулаты квантовой механики; докажите, что волновая функция и квантовые числа – характеристики микрообъекта в квантово-полевой картине мира; проведите количественное описание микрочастиц; опишите правила заполнения электронных оболочек многоэлектронных атомов.

Для осуществления самоконтроля при подготовке к собеседованию учащимся необходимо предоставить список наводящих вопросов. Например, докажите, что понятие «траектория» в отличие от материальной точки не применимо к микрообъекту? В чем проявляется дуализм свойств микрочастиц? В чем принципиальное отличие принципа суперпозиции в квантовой механике от принципа суперпозиции в классической механике? Можно ли теорию Бора назвать чисто квантовой и т. д. Отвечая на вопросы, учащиеся сопоставляют знания, полученные в курсе изучения классической и квантовой механики, и приходят к выводу квантовая механика дает более полное описание реального мира, чем классическая механика.

Изучение вопросов квантовой физики в сопоставлении и сравнении с классической механикой позволит сформировать у учащихся наиболее полные представления о строении и свойствах окружающего мира. Учащиеся должны понять, что квантовая механика не отрицает классическую, она уточняет границы их применения (области исследования знаний).

УДК 666.965 + 666.97

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

А.В. Рябинин

В статье рассмотрен процесс контроля физико-механических характеристик высокопрочного бетона с применением специализированных приборов и оборудования для анализа качества строительного материала, с примером наиболее актуального оборудования.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, приборы и оборудование, неразрушающий контроль, ультразвуковые колебания, ударно-импульсный метод, компьютерная обработка.

Существуют в основном две точки зрения об определении границы между обычными и высокопрочными бетонами. Согласно первой, высокопрочными следует называть бетоны, предел прочности которых больше, чем у применяемого в нем цемента, а согласно второй – бетоны, прочности которых превышают принятые в действующих нормативных документах.

Большое внимание получению высокопрочных бетонов и их применению в производстве железобетонных изделий было уделено на совещании по современным проблемам технологии бетона в промышленности сборного железобетона, которое состоялось в Москве в 1956 г. В.И. Сорокер, Я.Е. Иохельсон и О.В. Кунцевич и др. в своих докладах указали на целесообразность внедрения в производство железобетонных изделий высокопрочных бетонов марок 500–1000 и необходимость разработки комплексных мероприятий, обеспечивающих получение таких бетонов при сравнительно невысоких расходах цемента.

Высокопрочные бетоны значительно быстрее набирают прочность, чем традиционные бетоны. С точки зрения современной технологии, производство высокопрочного бетона сегодня не представляет принципиальных трудностей.

Под анализом, в данной статье, понимается процесс контроля физико-механических характеристик образцов высокопрочного бетона с применением специализированных приборов и оборудования для более качественной оценки на «профпригодность» строительного материала.

Для начала определимся, какие физико-механические свойства высокопрочного бетона наиболее важны: прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, морозостойкость, водопоглощение, и истираемость.

Данные экспериментальных образцов должны соответствовать государственным стандартам и только после этого мы можем говорить о каче-

стве и безопасности строительных материалов, а чтобы получить эти данные нужно строго соблюдать методику проведения экспериментов и желательно использовать более новое, качественное и точное оборудование в этой работе.

Чаще всего в научной литературе, периодике и СМИ мы много слышим о так называемом «неразрушающем контроле» бетона, так вот некоторые методы анализа свойств позволяют применять данную технологию.

Приборы неразрушающего контроля (ПНК) – условно принятый в технической литературе термин, включающий в себя приборы для толщинометрии и дефектоскопии покрытий и материалов, для определения твердости и прочности материалов, а также ряд других характеристик. Измерения вышеназванных параметров производятся различными методами: ультразвуковым (УЗ), рентгенографическим, вихретоковым, ударно-импульсным, упругого отскока, пластической деформации, магнитным, магнитопорошковым, термографическим, оптическим, импедансным, а также рядом других менее распространенных методов.

Само название метода, по-видимому, происходит от принятого в зарубежной литературе термина «non-destructivetesting» (NDT), также периодически встречающегося в отечественной технической литературе.

Параметрами, подвергаемыми неразрушающему контролю в бетонах, являются прочность, величина защитного слоя, влажность, морозоустойчивость, влагонепроницаемость и ряд других, то есть почти все те, которые мы выделили наиболее важными в самом начале статьи.

Приведем несколько примеров приборов, выпускаемых различными производителями и произведем сравнительный анализ их технических характеристик:

Агама-2РМ – прибор для ускоренного определения водонепроницаемости бетона

– Вакуумметрическое давление в камере прибора – не менее 0,06 МПа.

– Усилие, необходимое для создания рабочего разрежения в камере – не более 300 Н.

– Предел допускаемой относительной погрешности определения сопротивления материала проникновению воздуха не превышает 8 %.

– Цена деления отсчётного устройства – 0,1 с/см^3.

– Время, необходимое для полного заряда аккумуляторов – 10 ч.

– Мощность, потребляемая зарядным устройством – не более 18 Вт.

Бетон-32 – ультразвуковой прибор для контроля прочности и однородности бетона в образцах и конструкциях

– Диапазон измерения времени распространения УЗ колебание от 15,0 до 9 999,9 мкс.

– Время установления рабочего режима 1 с.

– Время установления показаний на цифровом дисплее прибора не более 1 с.

– Время непрерывной работы прибора от свежезаряженого аккумулятора типоразмера «РР3» (9,0 В) не менее 50 ч при температуре 20 °С.

– Порог включения автоматической сигнализации разряда встроенного источника питания (5,6 + 0,2) В.

– Напряжение питания прибора от 5,6 до 10,0 В.

– Дискретность отсчета цифрового дисплея прибора в режиме измерения времени распространения УЗ колебаний в диапазоне от 15,0 до 9 999,9 мкс – 0,1 мкс.

– Срок службы прибора не менее 5 лет.

– Диапазон рабочих температур окружающего воздуха и поверхности объекта контроля от –10 до +50 °С.

ОНИКС-2.62 – двухпараметрический метод измерения прочности ударно-импульсным методом с визуализацией сигнала

– Впервые реализованы визуализация и многофакторный анализ сигналов реакции объектов на ударное воздействие с получением амплитудных, временных, интегральных и спектральных характеристик объектов испытаний.

– Дефектоскопия изделий сопоставлением их реакции на ударное воздействие с эталонным сигналом (или спектром, полученным с помощью ПК).

– Повышенные точность измерений и достоверность результатов.

– Цифровой тракт: высокоточная скоростная оцифровка и обработка сигналов датчика-склерометра.

– Малые размеры и вес прибора и склерометра.

– Оцифровка, визуализация, фильтрация, статистическая обработка сигналов.

– Интеллектуальная обработка и архивация сигналов, результатов и условий измерений60 базовых градуировочных характеристик для различных материалов и видов бетона с функцией их уточнения посредством коэффициента совпадения Кс (ГОСТ 22690).

– Ввод градуировочных характеристик пользователя и названий материалов.

– Учет возраста, состава, условий твердения и карбонизации бетона.

– Сервисная компьютерная программа для считывания массива информации, экспорта в Excel и другие приложения, обработки, фильтрации, спектрального анализа, формирования отчетной документации.

БЕТОН-ФРОСТ – прибор для определения морозостойкости бетона

– впервые использована адаптивная математическая модель процесса испытаний, позволяющая исключить эталонную камеру из состава прибора и повысить точность измерений;

– прецизионная измерительная система, цифровой тракт;

– компактная и удобная измерительная камера из легкосплавных материалов;

– надежная система удаления воздуха из камеры;

– микропроцессорный электронный блок, автоматически определяющий морозостойкость бетона, отображающий динамику процессов на графическом дисплее и архивирующий результаты;

– возможность работы без эталонной камеры значительно снижает цену прибора;

– сервисная компьютерная программа;

– оптимальные массогабаритные показатели.

– запись процессов измерения температуры и объемных деформаций образцов при замораживании;

– моделирование эталонной камеры;

– интеллектуальная обработка информации;

– автоматическое определение морозостойкости бетона;

– отображение динамики процессов на графическом дисплее с подсветкой;

– система меню для выбора режимов работы;

– полная архивация процессов и результатов измерений.

Круг истирания ЛКИ-3М – прибор для определения истираемости бетона по ГОСТ 13087–81

– средний радиус трения истирающего диска – 170 мм;

– угловая скорость вращения истирающего диска – 30 об/мин;

– количество одновременно испытываемых образцов – 2 шт.;

– размер стороны основания испытуемых образцов – 70+1 мм и 50+1 мм;

– давление на испытуемый образец – 0,06 МПа (0,6 кгс/см^2);

– потребляемая мощность – 0,55 кВт;

– масса – 80 кг;

– размеры – 760×530×990 мм;

– энергопитание – 220 В, 50 Гц.

Кроме перечисленных методов и аппаратных средств контроля существует и ряд других менее распространенных, таких как инфракрасный, электрического потенциала, вибрационно-акустический, акустико-эмиссионный применение которых находится в стадии опытной эксплуатации либо очень сложно.

ФИЛИАЛ В Г. СНЕЖИНСКЕ

УДК 69.05:658.562

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА В РОССИИ

Н.Е. Крупнова

В статье рассматриваются ступени контроля качества в строительстве, которые применяются в настоящее время в России.

Ключевые слова: контроль качества; строительство; система контроля качества.

Контроль качества в строительстве и соблюдение обязательных требований нормативных документов существовал в нашей стране всегда, но имел различные формы. Ранее огромное влияние на систему контроля качества в строительстве оказывало явное преобладание спроса над предложением в этой отрасли. В условиях большого дефицита строительной продукции проблемы «освоения» капиталовложений и своевременного ввода объектов в эксплуатацию часто оттесняли на второй план проблемы качества. Особенно это касалось отделочных работ. На достаточно высоком уровне обычно решались лишь главные вопросы качества, связанные с надежностью и безопасностью объектов строительства.

Позже, в связи с переходом на рыночную систему, строительные организации оказались в совершенно иных условиях. Когда вместо проблем дефицита строительной продукции пришли проблемы поиска заказчиков и выживания в конкурентной борьбе. Это повлияло на систему контроля качества строительства, которая приняла формы, характерные для рыночных отношений. Но все же определенная часть существовавшей системы оказалась пригодной и для новых условий. В частности, основная часть обязательных требований СНиП 3.01.01–85* «Организация строительного производства», касающихся обеспечения качества строительно-монтажных работ, сохранила свою силу.

Система контроля качества строительства и соблюдения строительных норм и ранее, и в настоящее время имеет две ступени:

- внутренний (производственный) контроль;
- внешний контроль.

Внутренний контроль осуществляется персоналом самих строительных организаций (строительно-монтажных, проектно-изыскательских, предприятий стройиндустрии и др.) В строительно-монтажных организациях внутренний контроль включает три вида контроля:

- входной контроль поступаемой рабочей документации, конструкций, изделий, материалов и оборудования;
- операционный контроль, осуществляемый в ходе выполнения строительных процессов или операций;
- и частично приемочный контроль, осуществляемый после завершения отдельных видов работ.

При входном контроле проверяется соответствие показателей качества материалов, изделий и оборудования требованиям стандартов и технических условий, производится проверка проектной рабочей документации, её комплектности, достаточно ли в ней содержится технической информации для производства работ. Наличие сертификатов, паспортов или других сопроводительных документов, подтверждающих качество материалов, изделий, оборудования является обязательным.

При операционном контроле основными используемыми документами являются СНиПы, технологические карты и схемы операционного контроля. Главную роль в операционном контроле играют начальники участков, прорабы и мастера. При этом виде контроля проверяется последовательность технологических операций и состав нормативной документации; соблюдение технологических режимов, установленных документацией; качество выполненных операций и их результатов, соответствие их требованиям проекта.

Приемочный контроль проводится в ходе строительства или по его завершению. Он во многих случаях подразумевает участие «внешних» лиц (заказчика или проектировщика), поэтому он может считаться не только внутренним, но и внешним. По результатам приемочного контроля принимается документированное решение о пригодности объекта контроля к эксплуатации или выполнению последующих работ. Главный инженер организации руководит системой контроля качества через специальные службы. Например, геодезическую, строительную лабораторию, техническую инспекцию и т. д. Результаты всех видов контроля документируются.

Переход на рыночную систему существенно не изменил принципов внутреннего контроля качества строительства, но повысил заинтересованность строительных организаций в обеспечении высокого качества работ. Однако международная практика показывает, что такая организация контроля качества – это уже пройденный этап. Есть более совершенные формы. Появилась серия новых международных стандартов на системы качества – стандарты ИСО серии 9000. Эти стандарты установили единый, признанный в мире подход к договорным условиям по оценке систем качества и одновременно устанавливали правила отношения между производителями и потребителями продукции. Госстрой России специальным письмом рекомендовал всем строительно-монтажным организациям создавать у себя системы качества в соответствии с ИСО 9000. Для этого была ут-

верждена специальная целевая программа, предусматривающая организацию специальных курсов по обучению руководящих работников и специалистов, издание соответствующей литературы, оказание прочей методической помощи. Позже появились стандарты серии ИСО 14000, которые устанавливают требования к системам качества с точки зрения окружающей среды и безопасности продукции. Сертификаты систем качества на соответствие стандартам ИСО 14000 становятся сейчас не менее популярны, чем ИСО 9000.

Внешний контроль качества строительства осуществляется различными видами надзора, не зависящими от самой организации, по отношению к которой он проводится, а так же и государственными службами, административными и общественными инспекциями.

Кроме того работники проектной организации осуществляет авторский надзор за строительством. Его порядок и функции устанавливаются соответствующими нормативными документами. Авторский надзор проектных организаций проводится на протяжении всего периода строительства и приемки в эксплуатацию законченного объекта. Представители авторского надзора и технического надзора Заказчика имеют право запретить применение конструкций, изделий, деталей, материалов, которые не соответствуют ГОС, ТУ или проектной документации. Могут потребовать приостановить производство отдельных видов работ, выполняемых с нарушением проекта или в случаях применения некачественных конструкций, материалов, изделий.

Кроме того в условиях рыночной экономики появились еще две формы контроля: сертификация строительной продукции и услуг и лицензирование строительной деятельности, в том числе проектно-изыскательской.

Последние несколько лет строительная отрасль активно развивалась: увеличилось число компаний-застройщиков, появились новые материалы и технологии, позволяющие сократить сроки строительства и улучшить качество возводимых объектов. Однако финансовый кризис, охвативший Россию вслед за европейскими державами, затормозил развитие строительной сферы и внёс в работу строителей существенные коррективы. Возросла конкуренция, а с ней и требования клиентов к уровню работы с ними, к качеству продукции и услуг.

К примеру, если раньше застройщики стремились лишь к сокращению сроков строительства и увеличению объёмов, то сегодня основным вопросом строителей является экономия затрат при сохранении высокого качества продукции. А это в свою очередь приводит к повышению конкурентоспособности проекта строительства, увеличению его рентабельности, а также сокращению сроков реализации за счёт использования эффективных технологий и строгого контроля качества.

СОДЕРЖАНИЕ

ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ

Ильичев В.Г., Залавин Я.Е. Технологические резервы повышения качества геометрии периметра труб большого диаметра 3
Ильичев В.Г. Повышение ударной вязкости в пришовной зоне сварных труб для магистральных газопроводов 7
Космацкий Я.И. Совершенствование процесса инерционной выпрессовки пресс-остатка 11
Струин Д.О., Черных И.Н. Экспериментальные исследования калибровки валков оправочных станов продольной прокатки 15
Дубинский Ф.С., Мальцев П.А. Создание и совершенствование технологий прокатки сортовых профилей на базе разработанного программного комплекса 19
Иванов В.А., Яров Б.А. Предельные оценки плотности прессуемых порошковых смесей для контактных вставок электрического транспорта 23
Радионова Л.В., Гасленко М.И., Ахмедьянов А.М. Построение термокинетической диаграммы стали марки 80 с помощью комплекса Gleeble 3800 27
Храмков Е.В., Выдрин А.В. Физическое моделирование процессов прокатки труб на компьютеризированной экспериментальной установке 31
Винник Д.А., Машковцева Л.С., Галимов Д.М., Семисалова А.С. Исследование структуры и свойств монокристаллов $BaFe_{12}O_{19}$:Co, полученных осаждением из раствора 35
Винник Д.А., Машковцева Л.С., Еремин Е.В., Галимов Д.М. Исследование функциональных свойств монокристаллов $BaFe_{12}O_{19}$, легированных Ni, Cr, Al 39
Винник Д.А., Колодкина О.С., Жеребцов Д.А., Захаров В.Г. Выращивание легированных монокристаллов титаната свинца 43
Власов В.Н., Трофимова Т.С., Крапачева Е.Д. Фазовые равновесия и термодинамические свойства фаз в системах $FeO–SiO_2$ и $Al_2O_3–SiO_2$ 47
Галимов Д.М., Жеребцов Д.А. Углеродный композитный материал на основе фурфурилового спирта в дисперсной системе с участием триэтиленгликоля и поверхностно-активного вещества 51
Ердаков И.Н., Хохлов А.А., Фадеева М.В., Кадухина Л.Д. Совершенствование технологии алюминиевого литья на опытном производстве ЧТЗ-Уралтрак 55
Знаменский Л.Г., Варламов А.С., Верцюх С.С. Керамические формы на алюмоборфосфатном концентрате в литье по выплавляемым моделям 59
Лыкасов А.А., Рысс Г.М., Бородин И.С., Салапонов П.С. Исследование фазовых превращений при восстановлении шлака сульфидной плавки продуктами газификации углерода 63
Осипов А.М., Безганс Ю.В. Определение условий образования общей ванны жидкого металла при широкослойной наплавке 67
Пашкеев И.Ю., Пашкеев К.Ю. Выплавка ферровольфрама внепечным способом в перфорированном горне 70

Тепляков Ю.Н. Кинетика фазообразования при распаде вюстита, полученного окислением железа 74
Шабурова Н.А. Использование различных видов внешних воздействий для обработки металлических расплавов 78
Штин С.В., Лыкасов А.А. Фазовые равновесия в системе Fe–Ge–O при температурах 1050–1300 K 82
Ярославцев С.И., Иванов М.А., Безганс Ю.В. Анализ напряженного состояния сварных соединений рамы при изготовлении деталей рельсового транспорта 86
Яковлева К.Ю. Постановка задачи математического моделирования процесса оправочного волочения труб 90

ФАКУЛЬТЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ

Реш А.Г., Голубкова К.В. Перспективы использования бурого угля 94
Горбенко В.И., Грибанов А.И., Юртаев М.А. К выбору формы расчетных сеток при численном решении задач теплопереноса 96
Загидуллина А.И., Грибанов А.И. Использование водорода в энергетике 100
Жиргалова Т.Б., Каргаполова Н.Н. Энергоаудит промышленного предприятия ОАО «ПромГаз» г. Челябинска 102
Лымбина Л.Е. Энергетика Челябинской области в ее поступательном развитии 106
Осинцев К.В. Выбор технологии сжигания водоугольных суспензий 110
Осинцев К.В. Комбинированная технология активирования и выработки теплоты 115
Осинцев К.В. Модернизация систем сжигания котлов БКЗ-160 и БКЗ-220 ТЭЦ г. Бишкек 119
Жиргалова Т.Б., Зубеня В.И. Анализ реальных циклов теплофикационных установок 123
Торопов Е.В. Динамика массообмена в альтернативных пирометаллургических технологиях 128
Торопов Е.В. Оценка динамики теплопереноса в пирометаллургических технологиях 132
Харисов И.Д., Осинцев К.В. Методы интенсификации теплообмена посредством нанотехнологий 136
Сафонов В.И., Чистякова Ю.В. Моделирование тяговой сети городского электротранспорта 140
Валеев Р.Г., Ершов А.М., Валеев Г.С., Сидоров А.И. Особенности расчетов токов однофазного короткого замыкания в электрических сетях напряжением 380 В с воздушными линиями 145
Валеев Р.Г., Млоток А.В., Ершов А.М., Валеев Г.С., Сидоров А.И. Исследование токов и напряжений в различных режимах работы воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели 149
Прохоров В.В. Улучшение энергетических показателей выпрямителей с дроссельным управлением путем введения в схему дополнительных вентилей 151
Грамм М.И. Курс дедуктивной электротехники для магистров 155

Грамм М.И. Три современных пути расчёта электрической мощности трёфазных систем 158
Бакунин В.В. Повышение эффективности гидротаранной установки путём автоматизации конструкции 162
Волкова О.С. Использование гидроэнергетического потенциала водохозяйственных объектов челябинской области 166
Козин А.А. Применение технологии Smart Grid для энергоснажения потребителей с помощью группы ВЭУ 170
Мартьянов А.С. Моделирование потребления электроэнергии 174
Нараева Р.Р., Нараева А.А., Бодрова Е.С., Горбунова А.А. Возможности биотехнологий в развитии энергетики Челябинской области 178
Нараева Р.Р., Бондаренко А.В., Нараева А.А. Оценка энергетических ресурсов отходов лесозаготовок 182
Пташкина-Гирина О.С., Низамутдинов Р.Ж. Выбор схемы отбора тепла от низкопотенциального источника энергии 186
Рахматулин И.Р. Сравнительный анализ использования солнечного коллектора и солнечного концентратора для опреснения воды 190
Смолин В.И., Топольская И.Г., Калмаков В.А. Исследование характеристик асинхронного электропривода в режимах малых скоростей 194
Топольский Д.В., Топольская И.Г., Топольский Н.Д. Опыт моделирования в свободно распространяемой системе компьютерной математики Scilab 198
Усков А.Ю. Эффективность выравнивания графика электрической нагрузки жилого дома с электроотоплением 202
Четошникова Л.М., Петров С.П. Регулирование потребления энергии в микросетях 206
Четошникова Л.М., Четошников С.А. Выравнивание графика нагрузки в умной микросети 210
Шешуков А.В., Шешуков В.В., Нараева Р.Р. Получение тепловой энергии с применением процессов расщепления ядра атома $_{83}Bi^{210}$ 214
Шешуков В.В., Нараева Р.Р. Использование механизма фазовых превращений высшего рода для получения энергии 218
Клиначев Н.В., Кулёва Н.Ю., Сидоренко Н.Ю. Решение задачи синтеза параметров моментного двигателя для векторного электропривода стабилизированной платформы 222
Курносов Д.А. Использование настраиваемой модели вентильного двигателя в бездатчиковой системе векторного управления 226
Сидоренко Н.Ю. Особенности расчёта асинхронного двигателя с частотно-регулируемым управлением 230
Лохов С.П., Сивкова А.П. Исследование магнитопровода трансформатора с шихтованным сердечником 234
Козина Т.А., Сычев Д.А. Косвенное определение углового положения ротора в системе с импульсно-векторным управлением 237
Журавлев А.М., Сычев Д.А. Импульсно-векторный пуск синхронной реактивной машины независимого возбуждения 241

Брылина О.Г. Виртуальное моделирование многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя 245
Лохов С.П. Возможные влияния внутренних электронных оболочек атомов на их химические свойства и на процессы в ядре 249
Дудкин М.М. Сравнительный анализ динамических спектральных характеристик развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией 253
Бычков А.Е., Золотушкин С.Н. Структуры управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения 257
Белоусов Е.В., Журавлев А.М., Сычев Д.А. Тепловая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения 261
Егоров И.С., Гольдштейн М.Е. Объединенный регулятор потока мощности как элемент связи синхронного генератора с энергосистемой 265
Гольдштейн М.Е., Корбуков Н.В. Модель передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения как элемент программы расчета длительных режимов электрической сети 269
Прокудин А.В. Управление электромагнитными процессами в цепях возбуждения синхронного генератора с тиристорным устройством гашения поля 273
Садовников А.Н. Применение свободно-программируемых цифровых терминалов в централизованном комплексе релейной защиты и автоматики 277
Павлюков В.С., Павлюков С.В., Сусанин С.П. Модель элемента искусственного интеллекта и алгоритм ее обучения для решения задач управления режимами систем электроснабжения 281
Коржов А.В., Степанов А.Ю. Моделирование в ANSYS картины электромагнитного поля кабеля 6(10) кВ для оценки условий электробезопасности и проведения ресурсных исследований изменения диэлектрических свойств изоляции 285
Коржов А.В. Исследование состояния изоляции кабельных линий 6(10) кВ городских электрических сетей (г. Челябинск, г. Нефтекамск) 289
Тарасенко В.В. Усовершенствованный алгоритм адаптивной реконфигурации распределительной сети по критерию минимума потерь 293
Юрченко Е.Ю. Оценка причин травматизма на предприятиях электроэнергетики 297

ФИЛИАЛ В Г. ЗЛАТОУСТЕ

Кирсанова А.А. Влияние добавки модифицированной метакаолином на формирование структуры и свойств цементного камня 301
Козлов А.В., Буянов М.В., Шушканов Е.Г. Экспериментальное определение остаточных напряжений при гибке труб с раскатыванием методом электролитического растворения 305
Лисиенкова Л.Н., Дерябина А.И. Прогнозирование формоустойчивости материалов для изделий легкой промышленности 309
Максимов С.П., Кондратьев А.В. Разработка методики размерного контроля торцевых поверхностей 313

Миронов К.А., Козлов А.В., Иванов Н.В. Определение усилий при холодной гибке труб обкатыванием с использованием механического динамометра 317
Мязина Ю.С. Исследование деформации трикотажных полотен в условиях циклического растяжения 321
Пестов С.П. Оценка жесткости элементов технологической системы для обработки отверстий 325
Плотникова С.В., Полуэктов Е.А. Способ профилирования зубьев конической шестерни цилиндро-конических передач внутреннего зацепления 329
Трофимова С.Н., Максимов С.П. Анализ эффективности использования схем электроснабжения в городских электрических сетях 333
Хазиев Т.Р. Анализ неравномерности перемещения отрезной машины «Волжанка-4» 337
Козлов А.В., Чумичёв А.Е. Измерение температуры при гибке труб с раскатыванием методом искусственной термопары 341
Щетихина Л.В. К вопросу об особенностях уральской архитектуры первой половины XIX века 345

ФИЛИАЛ В Г. КЫШТЫМЕ

Светлов А.Ю. Алгоритмы адаптивного обнаружения движущихся радиолокационных целей на фоне пассивных помех 349
Суворова Н.Н. Особенности разработки техпроцесса обработки детали типа вал – муфта на станках с ЧПУ в условиях ОАО «Вишневогорский ГОК» 353

ФИЛИАЛ В Г. МИАССЕ

Войнов И.В., Морозов Б.А., Прокофьева Е.Н. Установка измерения пучинистости грунтов 357
Белугин В.Б., Мингалеев О.А. Анализ динамически настраиваемого гироскопа при вибрации основания 361
Голощапов С.С. Массовые расходомеры 365
Смоленцев Н.И. Классификация локальных электрических сетей и роль накопителя энергии для повышения их эффективности 369
Елисеев В.П., Носиков М.В. Использование нейронной сети для управления солнечной электростанцией 373
Елисеев В.П., Носиков М.В. Система хранения правил нейронной сети для управления энергетическим объектом 377
Брылев А.В. Выбор оптимального способа автоматического управления мощностью автономного энергокомплекса 381
Гуськова А.И. Составляющие экономической эффективности использования систем установок энергетики ВИЭ 385
Абрамов М.И. Подвеска грузового автомобиля с амортизатором адаптивного типа 389
Волохов В.А. Применение информационных технологий в образовательном процессе на примере дисциплины «Теория механизмов и машин» 394
Камерлохер В.А. Проектирование сто в Миасском городском округе 398

Краснокутский В.В. Повышение проходимости и снижение энергетических затрат автопоездов путем использования движителей прицепа 403
Слесарев Е.Н. Использование информационных технологий в преподавании дисциплин по метрологии, стандартизации и управлению качеством 408

ФИЛИАЛ В Г. САТКЕ

Баяндина Т.В., Баяндина М.А. Технология шпинельпериклазового материала и периклазошпинельных огнеупоров на основе отходов производства вторичного алюминия 411
Баяндина Т.В., Баяндина М.А. Вещественный состав и дообжиговые керамические свойства глинистого сырья Саткинского района 415
Марков А.Б. Влияние набухания тектонитов на устойчивость скальных массивов 418
Маркова М.В. Получение керамзита из глин Бакальских рудников 422
Миниахметова О.Ю. Обучение вопросам квантовой физики учащихся профильных классов в сопоставлении и сравнении с классической механикой 425
Рябинин А.В. Приборы и оборудование для анализа высокопрочного бетона 428

ФИЛИАЛ В Г. СНЕЖИНСКЕ

Крупнова Н.Е. Система контроля качества строительства в России 432

Техн. редактор А.В. Миних

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 18.06.2013. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 25,57. Тираж 200 экз. Заказ 286/511.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.