



# ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 14 (190)  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА 2010

ISSN 1990-8512

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Выпуск 13

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

**Редакционная коллегия серии:**

д.т.н., профессор, член-корреспондент  
АЭН РФ **Ю.И. Хохлов** (*отв. редактор*);

к.т.н., доцент **Б.Г. Булатов**  
(*зам. отв. редактора*);

к.т.н., доцент **Л.Т. Волков**;

**Д.В. Коробатов** (*отв. секретарь*);

д.т.н., профессор, заслуженный деятель  
науки и техники РФ **Е.В. Торопов**;

д.т.н., профессор **Л.И. Цытович**;

д.т.н., профессор **Ш.Н. Хусайнов**

Серия основана в 2001 году.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-26455 выдано 13 декабря 2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 19 февраля 2010 г. № 6/6 журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Подписной индекс 29564 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Электроэнергетика

ХОХЛОВ Ю.И., ФЕДОРОВА М.Ю., ШАБИЕВ С.Г. Методика расчета и направления разработки дизайна компенсированного выпрямительного агрегата для системы электроснабжения буровой установки нефтегазодобывающего комплекса .....	4
КРАСНОКУЦКИЙ И.Н. Управление электропитанием светильников с использованием методов нечеткой логики .....	11
ТАРАСЕНКО В.В. Генетический алгоритм выбора распределенной генерации .....	15
БЕЛЯЕВА Л.А., БУЛАТОВ Б.Г. Идентификация параметров ЛЭП по данным телеметрии .....	20

### Теплоэнергетика

ФИЛИНА Н.А., АЛИБЕКОВ С.Я. Исследования по определению теплотворной способности древесного опила и гранул, пропитанных нефтепродуктами .....	24
ПАНФЕРОВ В.И., ПАНФЕРОВ С.В. Автоматизированный контроль и анализ теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ .....	29

### Преобразовательная техника

ЦЫТОВИЧ Л.И. КАЧАЛОВ А.В. Интегрирующая интервало-кодовая синхронизация реверсивных тиристорных преобразователей .....	36
КАЧАЛОВ А.В. Синхронизация систем импульсно-фазового управления вентильных преобразователей на базе интегрирующего развертывающего преобразователя .....	40

### Электромеханика

УСЫНИН Ю.С., ГРИГОРЬЕВ М.А., ШИШКОВ А.Н., ВИНОГРАДОВ К.М., ГОРОЖАНКИН А.Н., БЫЧКОВ А.Е. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления .....	47
ЛУКЬЯНОВ С.И., КРАСИЛЬНИКОВ С.С., СУСПИЦЫН Е.С., ШВИДЧЕНКО Д.В., ПИШНОГРАЕВ Р.С. Разработка системы управления электроприводами МНЛЗ с целью предотвращения прорыва корочки непрерывно-литого слитка .....	52
КУПЦОВ В.В., ПЕТУШКОВ М.Ю., САРВАРОВ А.С. Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя ....	57
ВОЗМИЛОВ А.Г., ЯРУЛЛИН Р.Б. Техничко-экономическая эффективность виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами .....	61
СИВКОВА А.П. Автоматизированный комплекс для исследования петель магнитного гистерезиса .....	63
КАРАНДАЕВ А.С., ХРАМШИН В.Р., ЛУКИН А.А., ШУРЫГИНА Г.В., ГОЛОВИН В.В. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками ....	67

### Альтернативные источники энергии

КУЗНЕЦОВ Г.Ф., КЛЕЩЕВ Д.Г., КРЫМСКИЙ В.В., ЛАВРЕНТЬЕВ С.И., ГУРЕВИЧ С.Ю. О возможности получения энергии при электрических разрядах .....	73
КИРПИЧНИКОВА И.М., СОЛОМИН Е.В. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально-осевых ветроэнергетических установок .....	78

# CONTENTS

## Electric power engineering

- KHOKHLOV Y.I., FYODOROVA M.Y., SHABIYEV S.G. Calculation procedure and design basis of a compensated rectifier plant for a power supply system of a boring installation of an oil and gas extraction complex ..... 4
- KRASNOKUTSKY I.N. Lamps power supply management with the use of the fuzzy logic methods ..... 11
- TARASENKO V.V. Genetic algorithm of the distributed generation choice ..... 15
- BELYAEVA L.A., BULATOV B.G. Identification of the transmission lines parameters according to the telemetry data ..... 20

## Heat-power engineering

- FILINA N.A., ALIBEKOV S.Y. Research for detecting a caloric power of the oil rich wood saw dust and pellets ..... 24
- PANFEROV V., PANFEROV S. Automated control and analyz thermal regime of the building chemistry department SUSU ..... 29

## Converting technics

- TSYTOVICH L.I., KACHALOV A.V. Integrating interval-code synchronization of the reversing thyristor convertors ..... 36
- KACHALOV A.V. Synchronization of systems of the pulse-phase control of valve inverters on the base of integrating sweep converter ..... 40

## Electromechanics

- USYNIN Y.S., GRIGORIEV M.A., SHISHKOV AN., VINOGRADOV K.M., GOROZHANKIN A.N., BYCHKOV A.E. Power losses in the variable-speed electric drives at different control laws ..... 47
- LUKIANOV S.I., KRASILNIKOV S.S., SUSPITSYN E.S., SHVIDCHENKO D.V., PISHNOGRAEV R.S. Elaboration of the continuous caster electric drives control system for the runout of the sinterskin of the uninterruptedly-casted ingot prevention ..... 52
- KUPTSOV V.V., PETUSHKOV M.Y., SARVAROV A.S. Method of analysis of the electromagnetic torque for the problems of the finite element modeling of the induction motor ... 57
- VOZMILO A.G., YARULLIN R.B. Technical and economic efficiency of the vibro grain cleaner with controled parameters ..... 61
- SIVKOVA A.P. Automated complex for the magnetic hysteresis loop research ..... 63
- KARANDAEV A.S., KHRAMSHIN V.R., LUKIN A.A., SHURYGINA G.V., GOLOVIN V.V. Experimental researches of two-zonal speed control thyristor electric drives with improved energy characteristics ..... 67

## Alternative energy sources

- KUZNETSOV G.F., KLESHCHEV D.G., KRYMSKY V.V., LAVRENTIEV S.I., GUREVICH S.Y. On the possibility of energy generation in electrical discharges ..... 73
- KIRPICHNIKOVA I.M., SOLOMIN E.V. Towers vibration dampers of small vertical axis wind turbines ..... 78

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.632

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ДИЗАЙНА КОМПЕНСИРОВАННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

*Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.Г. Шабиев  
г. Челябинск, ЮУрГУ*

## CALCULATION PROCEDURE AND DESIGN BASIS OF A COMPENSATED RECTIFIER PLANT FOR A POWER SUPPLY SYSTEM OF A BORING INSTALLATION OF AN OIL AND GAS EXTRACTION COMPLEX

*Y.I. Khokhlov, M.Y. Fyodorova, S.G. Shabiyev  
Chelyabinsk, SUSU*

Рассмотрена методика инженерного расчета и сформулированы направления дизайна оборудования компенсированного выпрямительного агрегата для системы электроснабжения буровой установки.

*Ключевые слова:* компенсированный выпрямительный агрегат, буровая установка, система электроснабжения.

In this article procedure of an engineering calculation is considered and trends of a design of a compensated rectifier plant for a power supply system of a boring installation are formulated.

*Keywords:* compensated rectifier plant, boring plant, power supply system.

В работах [1–3] с целью повышения энергоэффективности основных технологических процессов предложено использовать компенсированные преобразовательные системы электроснабжения (СЭС) буровых установок. Для промышленного освоения первых компенсированных СЭС нефтегазодобывающего комплекса возникла необходимость разработки методики инженерного расчета всех характеристик компенсированного выпрямительного агрегата (КВА) системы. Такая методика, с одной стороны, позволяет рассчитать параметры, спроектировать основное оборудование агрегата и на основе этого разработать дизайн как самого КВА, так и всей СЭС буровой установки, а с другой стороны, определить основные энергетические показатели СЭС, напрямую связанные с проблемами качества электроэнергии и энергосбережения.

Проиллюстрируем методику на примере перевода одного из вариантов некомпенсированной СЭС [4] в компенсированный режим работы по схеме, представленной на рис. 1.

Рассматривается широко распространенная буровая установка БУ-4200/250 ЭК-БМ (Ч), пред-

назначенная для бурения газовых и нефтяных скважин с условной глубиной бурения до 4200 м. Электроснабжение буровой установки осуществляется от питающей сети напряжением 35 кВ через промежуточную подстанцию переменного тока 35/6 кВ с трансформатором Т1 и последующую воздушную одноцепную линию с напряжением 6 кВ. К распределительному устройству переменного тока с напряжением 6 кВ посредством двенадцатифазного КВА с трехобмоточным трансформатором Т2, компенсирующим устройством КУ и диодными выпрямительными мостами ВМ1 и ВМ2 подключено распределительное устройство постоянного тока 3. Мосты ВМ1 и ВМ2 могут соединяться как последовательно, так и параллельно. От шин постоянного тока 3 через автономные инверторы напряжения 4–7 питаются двигатели буровых насосов МН1 и МН2, двигатели цементировочных насосов МЦН1 и МЦН2, двигатель буровой лебедки МЛ, двигатель роторного ствола МР и двигатель верхнего привода МВП. Кроме того, к шинам постоянного тока 3 через тиристорные ключи 8 и 9 подключаются тормозные резисторы 10 и 11.

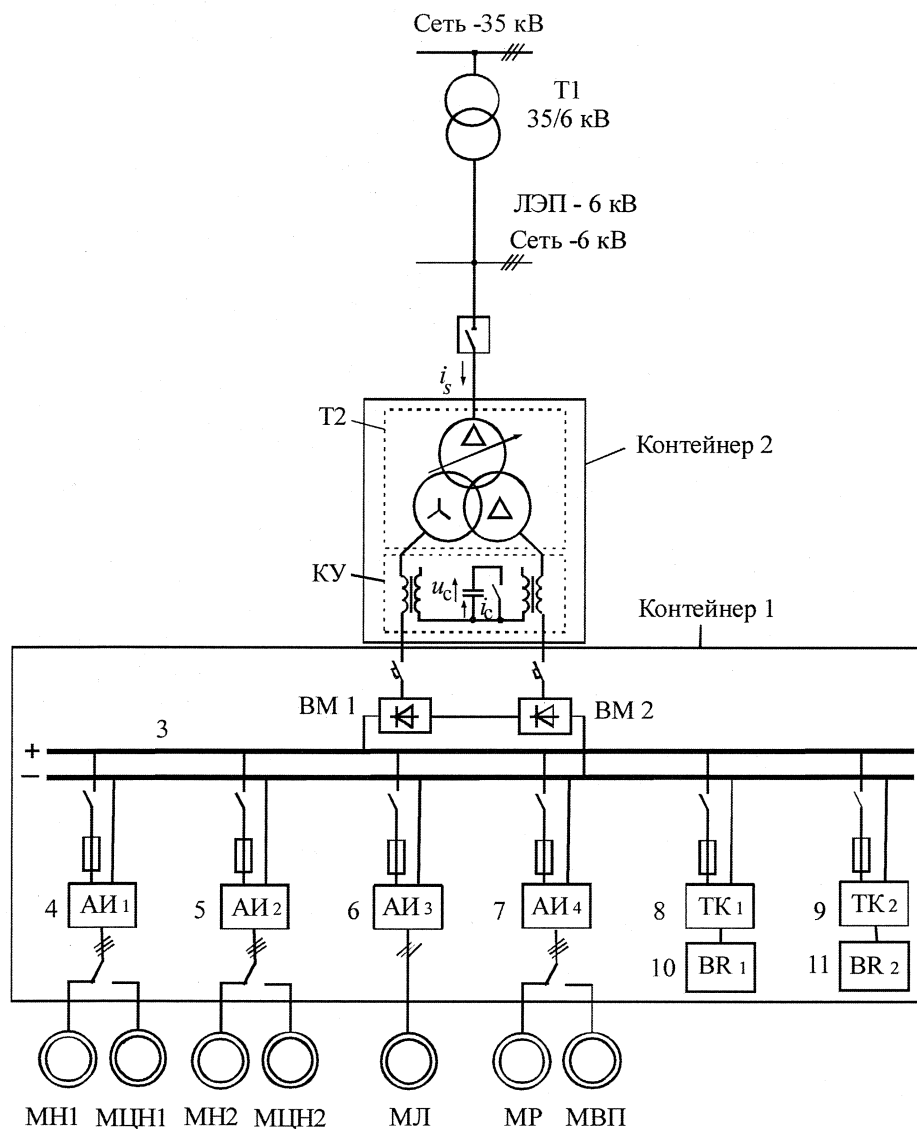


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема компенсированной СЭС буровой установки

В развернутом виде принципиальная схема КВА приведена на рис. 2 [5, 6]. Проведен подробный анализ электромагнитных процессов в СЭС с КВА в частотной (пути замыкания гармоник показаны на рис. 2) и временной областях. При создании инженерной методики расчета питающая сеть по отношению к КВА представлена источником ЭДС  $E_s$  и внутренним индуктивным сопротивлением  $x_s$ . Нагрузка в общем случае замещена активным сопротивлением  $R_n$ , индуктивным сопротивлением  $x_n$  и противо-ЭДС  $e_n$ . Ток нагрузки принят идеально сглаженным, что соответствует бесконечно большой величине  $x_n$ . Расчетная схема СЭС с КВА приведена на рис. 3.

Разработана серия программ и выполнены расчеты на ЭВМ всех необходимых для указанной методики характеристик. Графические зависимости этих характеристик приведены на рис. 4–12.

Все характеристики с целью универсальности построены в относительных единицах, при этом в качестве базисных тока, напряжения и мощности приняты следующие величины:

$$U_6 = E_{d0} = \frac{3h_1 E_{km}}{2\pi}; \quad I_6 = \frac{h_2 E_{km}}{x_k};$$

$$S_6 = U_6 I_6 = \frac{3h_1 h_2 E_{km}^2}{2\pi x_k},$$

где  $E_{km}$  и  $x_k$  – амплитуда коммутирующей ЭДС (линейного напряжения вентильных обмоток трансформатора Т2) и индуктивное сопротивление контура коммутации вентиляей;

$h_1(h_2)$  – число последовательно (параллельно) соединенных (по отношению к нагрузке) коммутирующих групп КВА; при последовательном соединении выпрямительных мостов  $h_1 = 4$ ,  $h_2 = 1$ , а при параллельном –  $h_1 = 2$ ,  $h_2 = 2$ .

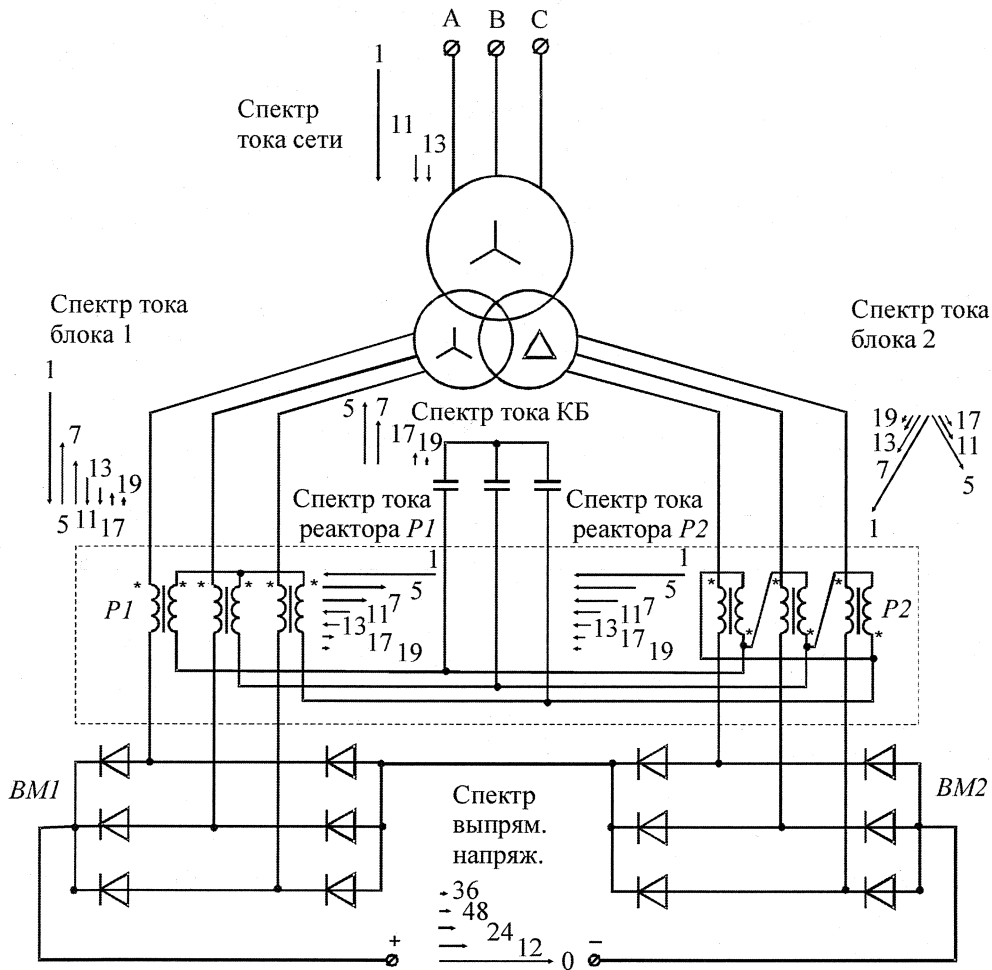


Рис. 2. Принципиальная схема компенсированного выпрямительного агрегата с указанием путей замыкания гармоник токов и напряжений

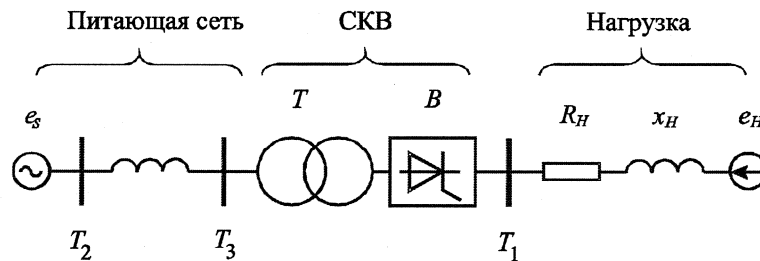


Рис. 3. Расчетная схема СЭС с КВА

Под величиной  $q$  на рис. 11, 12 понимается доля сопротивления  $x_s$  в сопротивлении контура коммутации вентилей  $x_k$  (иначе эта величина характеризует соотношение мощностей КВА и питающей сети). С возрастанием  $x_s$  (снижением мощности питающей сети, в частности, за счет увеличения длины воздушной ЛЭП) величина  $q$  возрастает, что приводит к увеличению искажения напряжения на входе КВА.

Рассмотрим алгоритм, определяющий суть предлагаемой методики расчета КВА. Исходными

для расчета данными являются параметры существующей некомпенсированной СЭС, а именно:

- напряжение и мощность короткого замыкания питающей сети 35 кВ;
- параметры трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ ;
- параметры воздушной ЛЭП-6кВ;
- графики нагрузки буровой установки и линейное напряжение на двигателях главных электроприводов.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. По известным соотношениям определяется индуктивное сопротивление контура коммутации

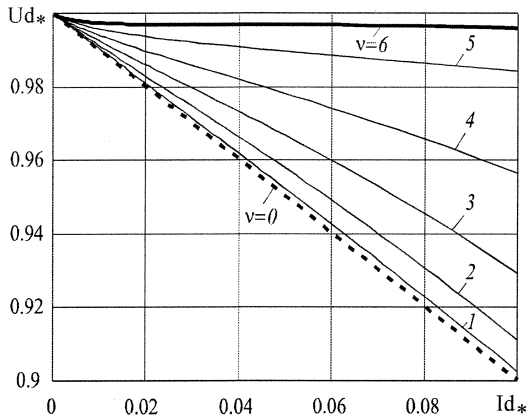


Рис. 4. Внешние характеристики КВА

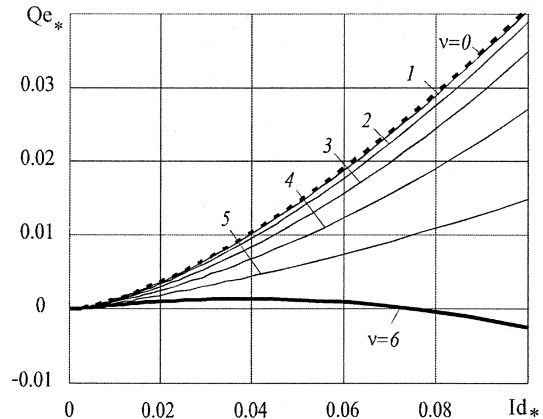


Рис. 5. Зависимости реактивной мощности, потребляемой КВА из питающей сети от тока нагрузки

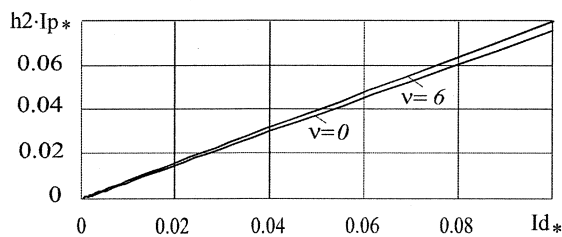


Рис. 6. Зависимости действующего значения тока в рабочей обмотке реактора от тока нагрузки

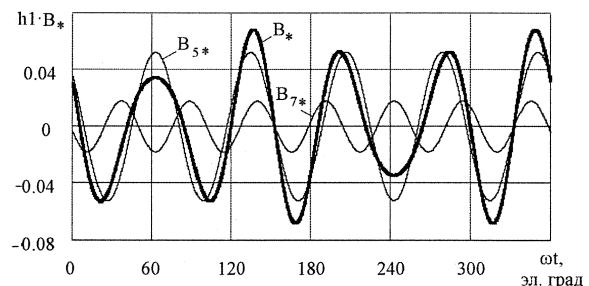


Рис. 7. Временные диаграммы магнитной индукции в магнитопроводе реактора при  $\nu = 6$ ;  $I_{d*} = 0,04$

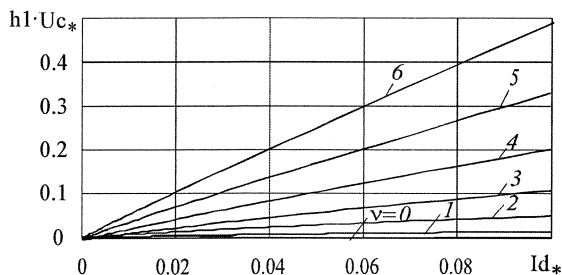


Рис. 8. Зависимости действующего значения напряжения на конденсаторной батарее от тока нагрузки

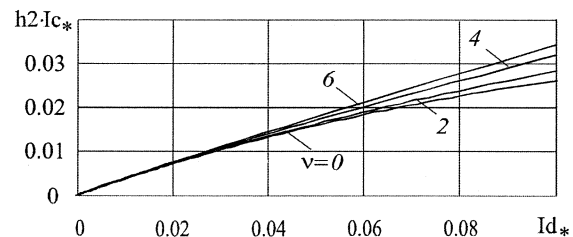


Рис. 9. Зависимости действующего значения тока конденсаторной батареи от тока нагрузки

вентилей  $x_k$ , приведенное к напряжению вентильных обмоток трансформатора Т2.

2. Устанавливаются номинальные величины выпрямленного напряжения и тока КВА из графиков нагрузки буровой установки. При их отсутствии напряжение на двигателях формируется с помощью инверторов с синусоидальной ШИМ, поэтому выпрямленное напряжение КВА должно быть равно или несколько выше амплитудного значения линейного напряжения на двигателях. При этом величину выпрямленного тока КВА можно определить исходя из мощности трансформатора Т2 с учетом коэффициента повышения расчетной мощности для мостовых преобразователей, равного 1,05.

3. По приведенным выше соотношениям рас-

считываются базисные величины напряжения, тока и мощности.

4. Определяется относительная величина выпрямленного тока  $I_{d*}$ .

5. По кривым на рис. 4 выбирается желаемая внешняя характеристика КВА и отвечающая ей величина  $\nu$ , под которой понимают относительное значение собственной частоты контура коммутации вентилей  $\nu = \sqrt{x_c/x_k}$ , где  $x_c$  – емкостное сопротивление фазы соединенной в звезду конденсаторной батареи КУ. При этом значению  $\nu = 0$  здесь и далее соответствуют характеристики некомпенсированного выпрямительного агрегата. С целью стабилизации выпрямленного напряжения следует выбирать характеристику со значением  $\nu$ ,

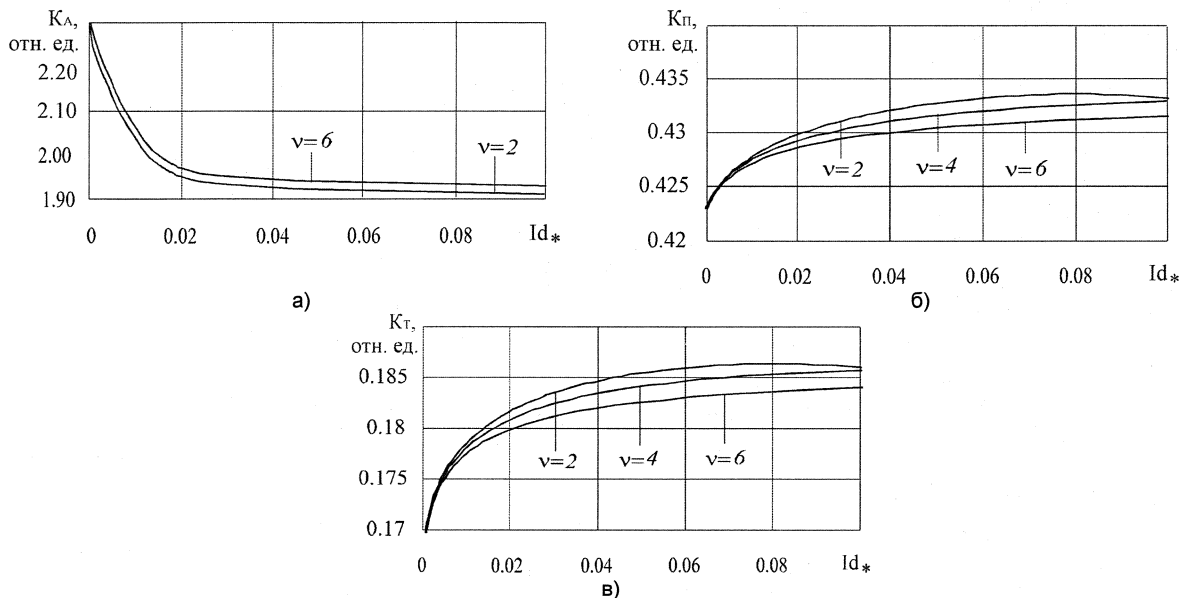


Рис. 10. Зависимости коэффициентов  $K_A$ ,  $K_P$  и  $K_T$  от тока нагрузки

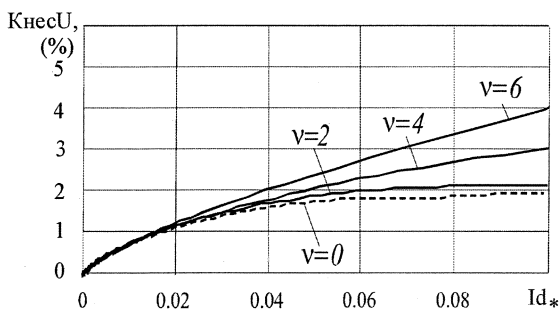


Рис. 11. Зависимости коэффициента искажения синусоидальности напряжения питающей сети от тока нагрузки при  $q=0,1$

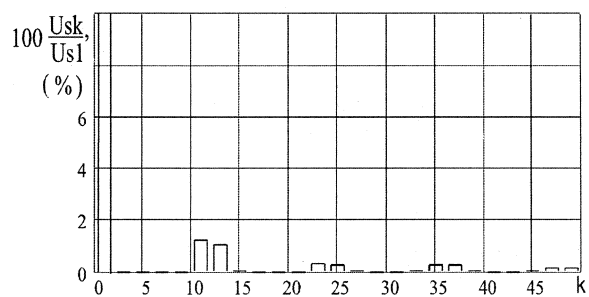


Рис. 12. Спектр напряжения питающей сети при  $v = 6$ ;  $q = 0,1$ ;  $I_{d*} = 0,04$

приближающимся к 6. За счет повышения жесткости внешней характеристики выпрямленное напряжение КВА несколько выше, чем у некомпенсированного агрегата. При необходимости повышенное напряжение КВА может быть скорректировано изменением коэффициента трансформации трансформатора Т2.

6. По кривым на рис. 5 с учетом базисной мощности устанавливается величина компенсируемой реактивной мощности при переходе агрегата в компенсированный режим работы с выбранным значением  $v$ . При необходимости величина компенсируемой реактивной мощности корректируется выбором соответствующего значения  $v$  совместно с учетом изменения внешней характеристики.

7. По кривым на рис. 6–9 с учетом базисных напряжения и тока устанавливаются параметры реакторов и конденсаторной батареи компенсирующего устройства при коэффициенте трансформации реактора Р1, равном единице. Емкость батареи на частоте 50 Гц устанавливается из приведенного выше выражения для  $v$ .

8. Выбираются конденсаторы конденсаторной батареи. Для наибольшей эффективности использования конденсаторной батареи целесообразно применение специальных конденсаторов, рассчитанных (см. рис. 2) на частоту 250 Гц. При применении промышленных конденсаторов, рассчитанных на работу в синусоидальном режиме с частотой 50 Гц, определяется предельно допустимое напряжение по трем критериям: по не превышению размаха изменения напряжения (сохранению электрической прочности), потерь в диэлектрике и номинального тока. При этом используются зависимости от  $I_{d*}$  и  $v$  коэффициентов амплитуды напряжения на конденсаторах в КВА (рис. 10, а) равенства потерь электрической энергии в диэлектрике (рис. 10, б) и равенства действующих значений токов через конденсаторы (рис. 10, в) [6].

9. По наименьшему предельному напряжению устанавливаются коэффициенты трансформации реакторов КУ и соответственно пересчитываются токи, напряжения и параметры элементов КУ.

10. По рис. 11 и 12 определяются и сравниваются с допустимыми по ГОСТ 13109–97 коэффи-



циент искажения синусоидальности и уровень высших гармоник напряжения питающей сети. При превышении допустимых значений, что может произойти при необходимости значительного возрастания длины воздушной ЛЭП, решается вопрос о применении на входе КВА резонансных фильтров минимальной установленной мощности, рассчитанных лишь на исключение в напряжении на входе КВА одиннадцатой и тринадцатой гармоник [7].

С использованием предложенной методики рассчитаны параметры КВА описанной выше СЭС при следующих исходных данных:

– мощность короткого замыкания на шинах 35 кВ – 500 МВ·А;

– трансформатор Т1 – ТМ-6300/35;  $ик\% = 7,5$ ;

– ЛЭП-6кВ – воздушная, одноцепная линия длиной 1 км с реактансом  $x_0 = 0,4$  Ом/км;

– трансформатор Т2 – трехобмоточный преобразовательный трансформатор  $S_T = 3200$  кВА;  $U_{1л} = 6,3$  кВ;  $U_{2л} = U_{3л} = 0,38$  кВ;

$ик_{BC} = ик_{ВН} = ик_{СН} = 8\%$ ;

– номинальное линейное напряжение на двигателях главных электроприводов 690 В.

Приведем основные результаты расчета для номинального режима работы СЭС с последовательным соединением выпрямительных мостов. Выбранная величина  $v = 6$ . К установке приняты конденсаторы типа КЭКФ-4-2УХЛ1 с номинальной частотой 50 Гц, для которых в соответствии с рис. 10 минимальным оказалось напряжение, определенное из условия сохранения потерь в диэлектрике и равное 1,72 кВ. Выпрямленное напряжение и компенсируемая реактивная мощность агрегата  $U_d = 1013$  В;  $\Delta Q_e = 760$  квар. Мощность реакторов компенсирующего устройства 160 В·А при одном витке рабочей обмотки. Коэффициенты трансформации реакторов Р1 и Р2 равны 33 и 57. Действующие значение тока и напряжения на рабочих обмотках реакторов 2,42 кА; 51,3 В. То же для компенсационных обмоток реактора Р1 – 73 А, 1,72 кВ и реактора Р2 – 42 А, 2,98 кВ. Действующие значения тока, напряжения и емкость фазы конденсаторной батареи соответственно равны 32 А, 1,72 кВ, 11,5 мкФ. Установленная мощность всех трех фаз конденсаторной батареи КУ – 180 квар. Таким образом, конденсаторная батарея в КВА используется более чем в 4 раза эффективнее, чем при включении ее в питающую сеть. Гармоническое воздействие КВА на питающую сеть в соответствии с рис. 11, 12 при выбранной длине воздушной ЛЭП удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109–97 во всех точках СЭС.

Рассмотренные выше компенсированные СЭС для нефтегазодобывающего комплекса будут разрабатываться впервые. Как и к любым объектам электроэнергетики к ним будут предъявлены вы-

сокие требования, в том числе и по техническому дизайну. В системах появляется новое электротехническое оборудование, поэтому возникает необходимость развития ранее принятых дизайнерских решений [1] применительно к этому оборудованию и его органичному вхождению в состав всей буровой установки. В соответствии с общей тенденцией создания буровой техники эти решения должны быть подчинены простоте, надежности, высокой ремонтоспособности оборудования, а также минимальным срокам при введении оборудования в эксплуатацию и возможности удобной транспортировки его автомобильным, морским и железнодорожным транспортом. Поэтому основное трансформаторное, реакторное, конденсаторное оборудование КВА, а при необходимости и фильтровое оборудование, предлагается выполнить в виде отдельного блока и расположить в специальном контейнере 2, а диодные выпрямительные мосты ВМ1 и ВМ2 – в контейнере 1 (см. рис. 2). Оба контейнера должны быть изготовлены в климатическом исполнении УХЛ1 по ГОСТ 15150-69. Все изложенные в [1] требования к контейнеру 1 относительно оснащения системами освещения, регулирования внутренней температуры, обогрева, кондиционирования, связи и пожарной сигнализации должны быть сохранены. Требования к контейнеру 2 в части регулирования температуры, обогрева и кондиционирования могут быть существенно упрощены. Габаритные размеры коридоров обслуживания в обоих контейнерах и современный дизайн должны полностью отвечать нормативным требованиям.

### Литература

1. *Технические решения и дизайн современной компенсированной преобразовательной подстанции нефтегазодобывающего комплекса / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтиев, С.А. Чупин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15. – С. 4–9.*

2. *Федорова, М.Ю. Проблемы разработки дизайна современных энергосберегающих систем электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов, С.Г. Шабиев // Вопросы планирования и застройки городов: материалы Междунар. конф. – Пенза: ПГУАС. – 2009. – С. 281–284.*

3. *Хохлов, Ю.И. Схемотехника и дизайн основного оборудования компенсированной преобразовательной системы электроснабжения буровой установки / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтиев // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: труды XXXIX конференции по электрификации. – М.: Технетика. – 2009. – Т. 1. – С. 217–219.*

4. *Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250 / Б.И. Абрамов и др. // Электротехника. – 2009. – № 1. – С. 8–13.*

5. Пат. 1124414 Российская Федерация. Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов. – заявл. 24.06.83; опубл. 15.11.84, Бюл. № 42.

6. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы

нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.

7. Пат. 2107374 Российская Федерация. Компенсированная преобразовательная система электроснабжения / Ю.И. Хохлов. – заявл. 10.07.96; опубл. 20.03.98, Бюл. № 8.

*Поступила в редакцию 14.02.2010 г.*

**Хохлов Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, декан энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения». Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения. Контактный телефон: 8-(351) 267-90-83.

**Khohlov Yuri Ivanovich** – doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the Academy of Electrotechnical Science of the Russian Federation, Dean of the Power Engineering Faculty of South Ural State University, Head of the Power Supply Systems department, expert in the field of electrical engineering theory, power electronics and power saving systems. Contact phone: 8-(351) 267-90-83.

**Федорова Мария Юрьевна** – старший преподаватель кафедры «Дизайн» ЮУрГУ. Специалист в области промышленного дизайна. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-26.

**Fyodorova Maria Yuryevna** – senior lecturer of the Design department of South Ural State University, expert in the field of industrial design. Contact phone: 8-(351) 267-94-26.

**Шабиев Салават Галиевич** – доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент Международной Академии архитектуры стран Востока, декан архитектурного факультета Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Архитектура». Специалист в области архитектуры гражданских и промышленных объектов. Контактный телефон: 8-(351) 267-98-24.

**Shabiyev Salavat Galievich** – doctor of architecture, professor, corresponding member of the International Academy of Architecture of East Countries, Dean of the Architectural Faculty of South Ural State University, Head of the Architecture department, expert in the field of architecture of civil and industrial units. Contact phone: 8-(351) 267-98-24.

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ СВЕТИЛЬНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*И.Н. Краснокуцкий*  
г. Омск, НПО «МИР»

## MANAGEMENT OF POWER SUPPLIES OF FIXTURES WITH USE OF METHODS OF FUZZY LOGIC

*I.N. Krasnokutsky*  
Omsk, Research-and-production association "WORLD"

Рассмотрены локальные и распределенные системы управления электропитанием светильников наружного освещения. Предложены алгоритмы выбора режима электропитания с использованием методов нечеткой логики. Приведены результаты моделирования в среде MATLAB. Показана экономическая эффективность.

*Ключевые слова:* электропитание, светильник, локальные и распределенные системы, нечеткий вывод, моделирование в MATLAB.

The local and distributed control systems of power supplies of fixtures of external illumination are considered. Algorithms of a choice of a mode of power supplies with use of methods of indistinct logic are offered. Results of modelling in the environment of MATLAB are resulted. Economic efficiency is shown.

*Keywords:* power supplies, the fixture, the local and distributed systems, an indistinct conclusion, modelling in MATLAB.

Повышение уровня автоматизации электротехнических комплексов и внедрение интеллектуальных систем управления энергоемкими объектами одна из актуальных задач современной науки. Одним из таких объектов считается система управления электропитанием светильников наружного освещения.

Один из вариантов решения задачи автоматического включения светильников наружного освещения осуществляется локальными системами на основе фотореле (ФР) или автоматов включения освещения (АВО) по сигналу от датчика естественной освещенности (Д). Структурная схема локальной системы управления наружным освещением приведена на рис. 1.

При уменьшении освещенности в вечернее время сопротивление фоторезистора увеличивается, пороговое устройство в электронном блоке при

заданном значении сопротивления срабатывает и подает напряжение на исполнительное реле, включая освещение. При увеличении освещенности сопротивление фоторезистора уменьшается и при определенном его значении пороговое устройство выключает освещение.

Таким образом, при использовании фотореле и автоматов включения освещения их необходимо перестраивать под конкретные условия, а с изменением естественной освещенности в течение года, делать это приходится достаточно часто, что, в свою очередь, требует дополнительных затрат.

Более сложными являются автоматизированные распределенные системы управления электропитанием светильников наружного освещения. Структура такой системы в соответствии с назначением и объемом выполняемых задач представляет собой многоуровневую систему, построенную

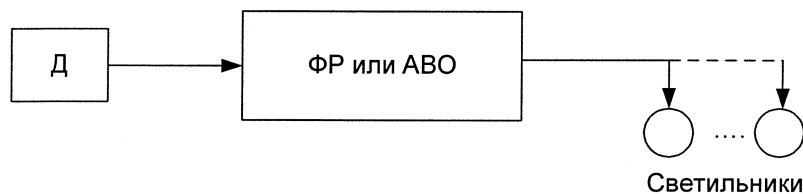


Рис. 1. Структурная схема управления освещением

по иерархическому принципу с необходимым составом оборудования на каждом уровне: нижний уровень – электронная энергосберегающая или электромагнитная пускорегулирующая аппаратура, устанавливаемая в светильники, датчики контроля целостности линий. Средний уровень – территориально распределенные контролируемые питающие пункты с контроллерами и средствами связи с пунктом управления (ПУ). Верхний уровень – ПУ или центральный диспетчерский пункт, состоящий из сервера телемеханики со средствами связи, программного комплекса, одного или нескольких автоматизированных рабочих мест (АРМ) на базе ПЭВМ, объединенных в локальную вычислительную сеть. Структурная схема системы в общем виде представлена на рис. 2 [1]. В качестве источников информации о параметрах системы управления электропитанием освещения и состоянии необходимых параметров окружающей среды используются различные датчики. Датчики освещенности предназначены для измерения уровня естественной освещенности. В качестве датчика можно использовать любой светочувствительный прибор (фотодиод или фоторезистор).

Датчики электрических параметров получают информацию о значении напряжения, тока, потребляемой мощности в каждой фазе, об обрывах и замыканиях в питающих сетях. Датчик ручного управления определяет переход контроллера в местный режим управления, который необходим при выполнении ремонтных работ на линии.

Вся информация с датчиков поступает на контроллер К, который содержит в памяти расписание режимов работы и при пропадании связи с персональным компьютером ПК центрального поста, обеспечивает автономный режим работы системы освещения. ПК задает режимы работы системы освещения, собирает и хранит информацию об ее функционировании.

После обработки полученной с датчиков информации контроллер подает управляющие воздействия на исполнительные устройства. Переключатели предназначены для полного или частичного включения или отключения ламповой нагрузки от сети. Они могут быть электромеханическими (реле или контакторы), статическими

(на базе тиристоров или транзисторов) и гибридными. Регуляторы сетевого напряжения предназначены для плавного или дискретного регулирования светового потока источников света. Они могут быть как индивидуальными, так и групповыми. В зависимости от используемых источников света питающее напряжение на них может подаваться как непосредственно, так и через нерегулируемую пускорегулирующую аппаратуру (ПРА). Принцип действия регулируемых ПРА основан на изменении их внутреннего сопротивления. Использование такой аппаратуры позволяет отказаться от регуляторов сетевого напряжения и нерегулируемой ПРА [1].

Силовые линии наружного освещения разделяются на питающие, распределительные и групповые. Питающие – это линии от распределительного устройства тяговой подстанции до вводного устройства (ВУ), вводно-распределительного устройства (ВРУ), главного распределительного щита (ГРЩ). Распределительные сети идут от ВУ, ВРУ, ГРЩ до распределительных пунктов, групповых щитов и пунктов питания наружного освещения. Групповые сети – это линии от групповых щитов (питающих пунктов) до светильников. Пример схемы групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом и питанием светильников HL1–HL4 наружного освещения от фазного напряжения представлен на рис. 3 [1].

Как видно из рис. 3, подключение светильников осуществляется с чередованием фаз питающего напряжения. Это делается для того, чтобы уменьшить коэффициент неравномерности освещения при отключении одной или двух фаз в результате аварии. По этой же причине при монтаже силовых линий не подключают установленные рядом светильники к одной фазе питающего напряжения. К тому же такой способ подключения эффективен при использовании ночного режима с отключением части светильников и позволяет регулировать общее потребление электроэнергии в зависимости от текущего значения естественной (солнечной) освещенности и времени суток.

В качестве алгоритма выбора режима освещения предлагается использовать методы нечеткой логики [2]. При использовании пускорегулирующей

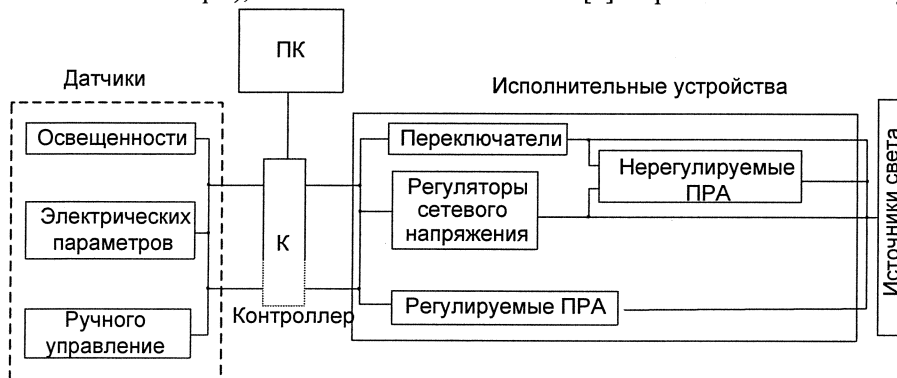


Рис. 2. Структурная схема АСУ наружным освещением

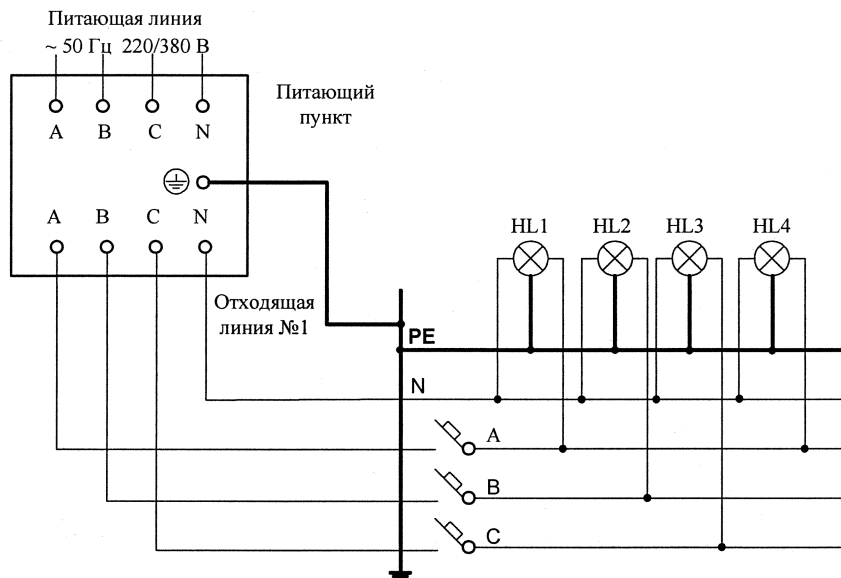


Рис. 3. Схема питания групповых линий наружного освещения

шей аппаратуры можно выделить семь дискретных режимов включения наружного освещения с шагом в 16,7 % от номинальной мощности. Если нет необходимости использовать такие частые режимы переключения, то возможно сокращение системы с отказом от пускорегулирующей аппаратуры, тогда шаг включения составит 33,3 % от номинального (под номинальной мощностью здесь и далее понимается потребляемая мощность при включении трех фаз системы наружного освещения в режиме 100 %). При этом формируются логические переменные: входные (естественная освещенность и время суток) и выходные (мощность включения, в процентах от максимальной). По

результатам исследований измеренных значений естественной освещенности определены лингвистические переменные, функции принадлежности и их связь с численными значениями входных и выходных величин. Основные статистические показатели процесса изменения естественной освещенности за период наблюдений, равный одной неделе, представлены в табл. 1.

На основе полученной статистической информации разработан алгоритм принятия решения о необходимом режиме включения освещения. С учетом проведенных экспериментальных исследований один из вариантов базы правил нечеткого вывода представлен в табл. 2.

Таблица 1

Статистические показатели полного сигнала за семь суток апреля

Статистические характеристики	Оценки	День недели						
		1	2	3	4	5	6	7
Математическое ожидание, $M_x$	Суточные	0,0564	0,0579	0,0625	0,0556	0,0543	0,0577	0,0586
	Накопленные	–	0,0579	0,0594	0,0584	0,0575	0,0576	0,0577
Дисперсия, $D_x$	Суточные	0,0002	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
	Накопленные	–	0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Третий момент, $\bar{\mu}_3$	Суточные	-1,54 E-06	5,33 E-07	-1,05 E-06	-9,95 E-07	-9,52 E-07	-1,07 E-06	-1,07 E-06
	Накопленные	–	2,30 E-07	-1,11 E-08	-3,81 E-08	-3,61 E-08	-1,77 E-07	-2,75 E-07
Четвертый момент, $\bar{\mu}_4$	Суточные	5,81 E-08	1,06 E-07	2,26 E-07	7,88 E-08	6,14 E-08	5,23 E-08	4,99 E-08
	Накопленные	–	6,86 E-08	1,02 E-07	8,62 E-08	7,62 E-08	6,97 E-08	6,45 E-08
Ассиметрия, $A_s$	Суточные	-0,753	0,129	-0,165	-0,467	-0,533	-0,409	-0,406
	Накопленные	–	0,104	-0,003	-0,014	-0,015	-0,080	-0,131
Экссесс, $EE_s$	Суточные	-0,766	-1,394	-1,097	-0,130	-0,164	-1,559	-1,641
	Накопленные	-0,766	-0,626	-0,904	-0,724	-0,581	-0,588	-0,592

Свод правил

Освещенность	Время суток			
	Утро	День	Вечер	Ночь
Нулевая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Очень низкая	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая
Средняя	Очень низкая	Очень низкая	Очень низкая	Очень низкая
Высокая	Нулевая	Нулевая	Нулевая	Нулевая

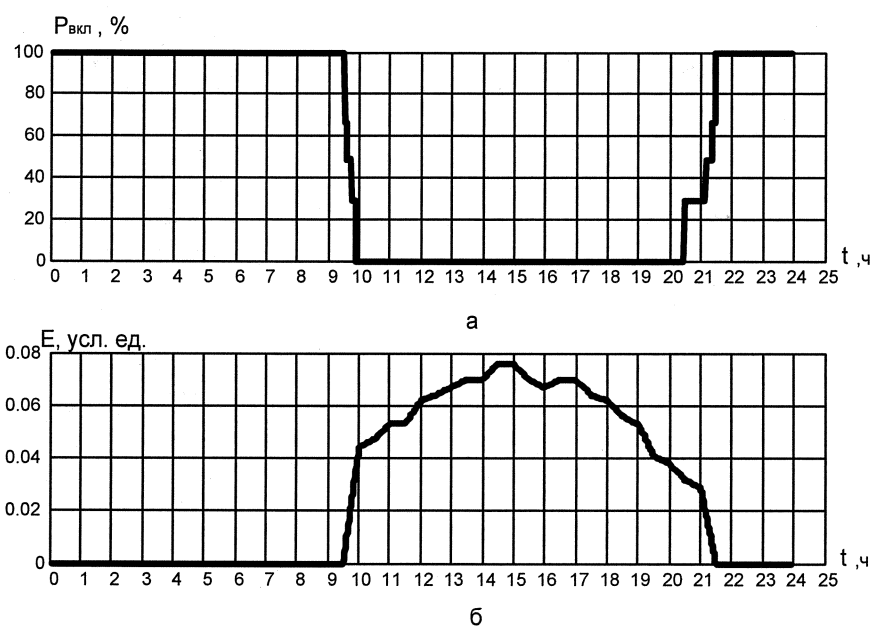


Рис. 4. Результаты моделирования алгоритма управления:  
а – мощность включения; б – естественная освещенность

Алгоритм управления наружным освещением осуществляется по методу Мамдани [3]. В качестве дефазификации или приведения к четкости применяется метод наибольшего (правого) модального значения.

Результаты моделирования логического вывода в среде MATLAB [2, 4] с экспериментальными замерами естественной освещенности представлены на рис. 4.

Таким образом, использование алгоритмов принятия решения о необходимом режиме включения электропитания светильников наружного освещения на основе нечеткой логики позволяет снизить расходы электроэнергии. Расчетное снижение в часы восхода и заката солнца составляет

до 50 %, что приблизительно равно 4 % суточного потребления системы наружного освещения.

### Литература

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
3. Леоненко, А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech / А. Леоненко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.

Поступила в редакцию 15.10.2009 г.

**Краснокуцкий Иван Николаевич.** Инженер отдела автоматизации НПО «МИР», соискатель Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС). Конт. тел.: 8-905-099-2334.

**Krasnokutsky Ivan Nikolaevich.** Research-and-production association "WORLD", The engineer of department of automation. The competitor of Omsk State Transport University (OSTU) Contact phone: 8-905-099-2334.

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

*В.В. Тарасенко*  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## MANAGEMENT OF POWER SUPPLIES OF FIXTURES WITH USE OF METHODS OF FUZZY LOGIC

*V.V. Tarasenko*  
Chelyabinsk, SUSU

Приведены принципы построения математической модели и алгоритм. Дан сравнительный анализ расчёта простейшей сети описанным методом и методом прямого перебора вариантов.

*Ключевые слова:* распределённая генерация, генетический алгоритм, аппроксимация, целевая функция.

The principles of construction of mathematical model and algorithm are given. The comparative analysis of the simple network calculation using the described above method and direct enumeration method is represented.

*Keywords:* distributed generation, genetic algorithm, approximation, objective function.

На современном этапе развития систем энергоснабжения всё чаще возникают ситуации, когда потребитель предпочитает иметь собственный источник энергии. Такими источниками в России обычно служат газопоршневые и газотурбинные установки мощностью от нескольких десятков киловатт до десятков мегаватт, устанавливаемые в распределительной сети 0,4–35 кВ.

Ввиду того, что распределённая генерация (РГ) для России – явление новое, ещё не разработано эффективных методов выбора места расположения и мощности станций. До сих пор при принятии решения о строительстве станций используются методы сравнения вариантов. Такой подход был оправдан при строительстве крупных станций, когда количество возможных конкурентных вариантов исчисляется единицами и десятками. В распределительной же сети бывает целесообразно устанавливать несколько малых электростанций, причём сочетания мест расположения, числа и мощности блоков могут быть самыми разнообразными. Число возможных комбинаций с усложнением конфигурации сети и расширением модельного ряда генераторов растёт экспоненциально.

Представим упрощённую ситуацию, являющуюся наиболее характерной при анализе вариантов размещения РГ. Имеется распределительная сеть города или промышленного предприятия, по которой обеспечивается электроснабжение нескольких трансформаторных подстанций (ТП) с прогнозируемыми нагрузками на шинах 0,4 кВ

(рис. 1). Полагаем, что на основе проведённых изысканий определены возможные площадки, расположенные вблизи некоторых ТП, для размещения установок РГ и определены возможные типы этих установок. Переменными математической модели для оптимизации такой сети будут приняты число блоков каждого возможного типа. В качестве ограничений могут рассматриваться условия выдачи мощности во внешнюю сеть, баланс электрической мощности в каждом узле, баланс тепловой мощности, ограничения по экологическим условиям, выделяемой площади и т. п. Принимаем, что для возможных к установке блоков известны основные технико-экономические показатели (ТЭП): мощность, прогнозируемый удельный расход топлива для каждого типа блоков

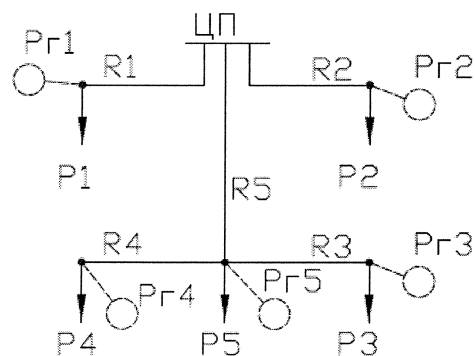


Рис. 1. Схема сети с возможными площадками для установки РГ

с учётом тепловой нагрузки, затраты на поставку и монтаж, удельные эксплуатационные расходы и т. п. Для покрытия нагрузок ТП предусматривается возможность частичного питания их от распределительной сети по тарифу розничного рынка электроэнергии. В качестве критерия оптимизации принимаются приведённые затраты на установку и эксплуатацию комплекса РГ.

Для решения задач оптимизации в математике разработано множество различных методов. Самые распространённые оптимизационные модели на основе линейного и нелинейного программирования используются для решения непрерывных задач. В результате решения мощность генераторов обычно не соответствует стандартному ряду номинальных мощностей, характерному для данного производителя, округление же до ближайшей стандартной часто даёт неверный результат [4]. Вторая проблема – необходимость учёта логических операций. В модели сети с РГ изменение ряда показателей происходит скачкообразно в зависимости от мощности установки. В ряде случаев приходится выбирать наибольшее значение из полученных на этапах расчёта величин. Такие операции описываются с использованием логических операторов, наличие которых в модели делает невозможным применение методов оптимизации, основанных на производных. Для решения дискретных задач разработаны специальные методы, основанные на направленном переборе вариантов, например «метод ветвей и границ». Реализация

этих методов также сопряжена с трудностями из-за наличия элементов логики. Самым простым способом преодоления всех этих затруднений являются методы нулевого порядка с прямым перебором вариантов [3]. Однако этот способ имеет существенный недостаток: так называемое «проклятие размерности».

Решение задачи можно найти, используя алгоритмы, моделирующие природные процессы. В качестве такого нами был принят генетический алгоритм (ГА) [5]. Этот способ решения оптимизационных задач позволяет существенно сократить время поиска оптимального решения. Ему не страшны локальные минимумы, а увеличение размерности задачи не приводит к экспоненциальному росту объёма вычислений. Прямое вычисление целевой функции не требует ограничений на применяемые операторы. Механизм поиска оптимального решения сходен с процессами эволюции и естественного отбора в природе (рис. 2). При этом роль хромосом выполняют рассматриваемые параметры модели: мощности блоков и их количество в заданный промежуток времени, выбираемые из представленного ряда случайным образом. Заданное количество хромосом определяет особь, которая характеризуется функцией  $F(n_1, n_2, \dots, n_i, p_1, p_2, \dots, p_i)$ , где  $n_i, p_i$  – количество и номинальная мощность блоков в  $i$ -м узле, представляющие собой векторы  $\vec{N}$  и  $\vec{P}$ . Одновременно в процессе эволюции участвует сразу несколько

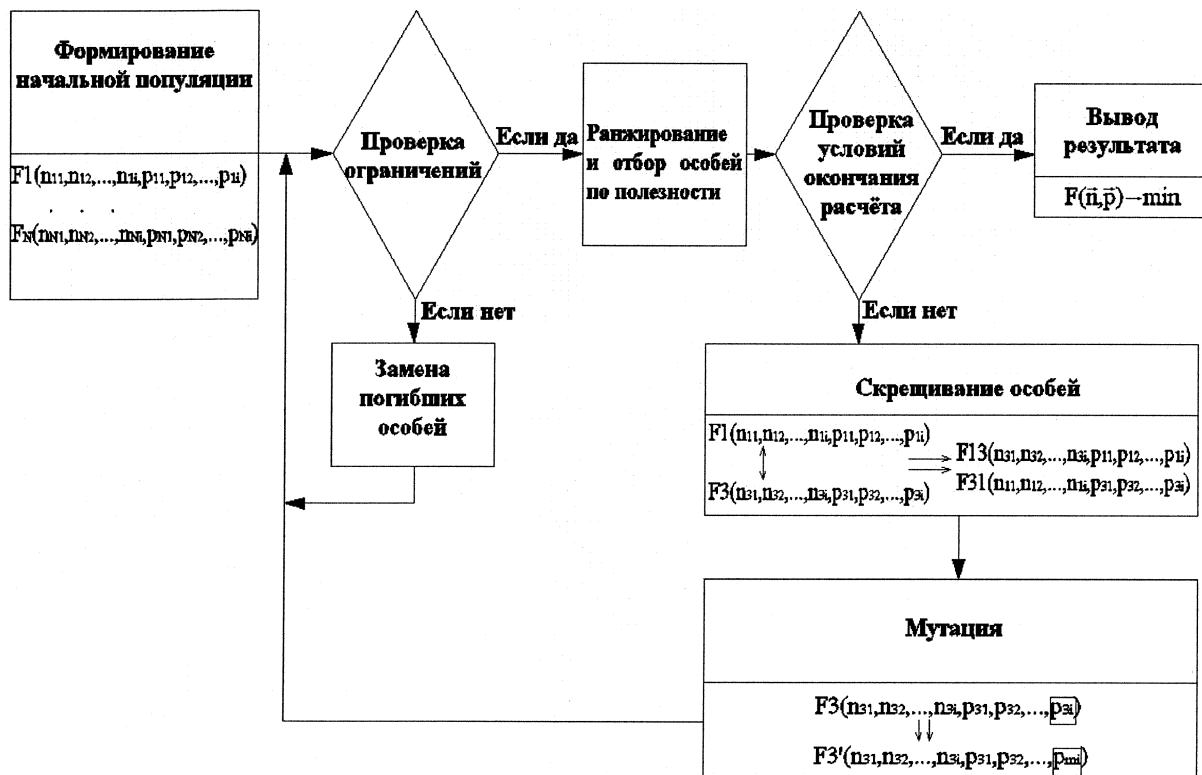


Рис. 2. Схема генетического алгоритма



особей ( $N$ ), образующих популяцию. Особи обладают способностью скрещиваться, порождая потомков путём частичного случайного обмена хромосомами. Каждая хромосома обладает способностью мутировать с заданной вероятностью. Особи имеют определённый уровень качества, который характеризуется значением целевой функции. Выживают и имеют право дать дальнейшее потомство только наиболее приспособленные особи. Таким образом, генетический алгоритм осуществляет поиск не путём улучшения одного решения, а путём использования сразу нескольких альтернатив на заданном множестве решений. В процессе эволюции накапливается генетический материал, и алгоритм быстро сосредотачивается на околооптимальном решении. Вероятность попадания в локальный оптимум исключается вероятностным распределением начальных решений и мутациями. Для реализации поиска оптимальных мест размещения и мощности генераторов методом ГА использовалась программа «Easy NP 2.0» [9].

Определившись с методом решения оптимизационной задачи, можно перейти к разработке математической модели сети с распределённой генерацией, ориентированной на этот метод. В [6] уже рассматривались общие принципы построения такой модели.

Большинство экономических показателей газопоршневых установок с достаточной точностью описывается линейными и квадратичными функциями. На рис. 3 показана зависимость стоимости когенераторов фирмы Deutz от их номинальной мощности, определяемая выражением:

$$F(P_G) = 142,919 + 0,314 \cdot P_G, \quad (1)$$

где  $P_G$  – номинальная мощность блока, кВт.

Коэффициенты линейного уравнения были найдены методом наименьших квадратов (МНК). Исследования показали [6], что затраты на установку блоков, доставку, проектные работы, монтаж, топливо, затраты на покупку и укладку кабелей 0,4 кВ хорошо описываются линейными функциями. Некоторые зависимости целесообразно описывать квадратичными функциями.

Электрические и тепловые нагрузки в сети

определяются в соответствии с прогнозируемым суточным графиком нагрузок и сезонными изменениями. Тариф на электроэнергию, покупаемую из сети, также может зависеть от времени суток. Всё это влияет на экономическую эффективность эксплуатации электростанции. Для учёта суточных и сезонных изменений условий эксплуатации, рассматривается работа станции за определённый интервал  $j=1 \dots M$ , в течение которого условия предполагаются неизменными и равными усреднённому за этот период значению. При этом значительно возрастает объём вычислений. Полученные значения состава работающего оборудования за каждый период времени будут использоваться при определении эксплуатационных затрат. Капитальные вложения определяются по наибольшему числу одновременно работающих за один период блоков с учётом необходимого резерва:

$$n_i = \max(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iM}). \quad (2)$$

В каждом конкретном случае оптимизационная модель может учитывать индивидуальные особенности рассматриваемой системы. Например, возможность продажи электроэнергии сторонним потребителям через внешнюю сеть, учёт затрат в топливоснабжающую систему, на отводимую площадь, на развитие электрической сети, модернизацию распределительных устройств и т. п. Ниже представлены разработанные алгоритмы для пакета Easy NP 2.0, позволяющие определить характерные составляющие затрат.

Капитальные затраты на установку блоков:

$$K_1 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_1 + a_2 \cdot P_{Gi}), \quad (3)$$

где  $n_i$ ,  $n_{pi}$  – количество рабочих и возможных резервных блоков, устанавливаемых в  $i$ -м узле;  $P_{Gi}$  – номинальная мощность генераторов в  $i$ -м узле, кВт;  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты линейной аппроксимации.

Капитальные затраты на строительную часть и монтаж блоков и инженерных систем под ключ:

$$K_2 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_3 + a_4 \cdot P_{Gi}), \quad (4)$$

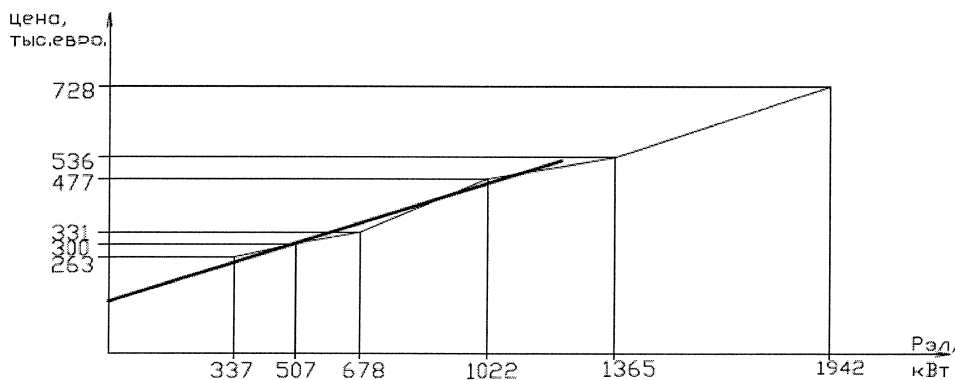


Рис. 3. Стоимость когенераторов фирмы Deutz

где  $a_3, a_4$  – коэффициенты линейной зависимости затрат на строительство и монтаж от мощности блоков.

Транспортные расходы:

$$K_3 = \sum_{i=1}^N (n_i + n_{pi}) \cdot (a_5 + a_6 \cdot P_{ri}), \quad (5)$$

где  $a_5, a_6$  – коэффициенты линейной аппроксимации функции зависимости стоимости доставки генератора мощностью  $P_{ri}$  до места строительства.

Аналогично определяются другие составляющие затрат, связанные с установкой блоков.

Возможны различные варианты работы станции по отношению к внешней сети. В случае параллельной работы без выдачи мощности в сеть, но с возможностью покрытия недостающих нагрузок от сети, общие затраты «на присоединение к сети» будут определяться выражением:

$$K_5 = b_0 + b_4 \sum_{i=1}^N (n_i \cdot P_{ri}) + b'_5 \cdot \left( n_p \cdot P_{zmax} - \sum_{i=1}^N P_{ri} \cdot n_{ip} \right) + b'_3 \cdot \left( \sum_{i=1}^N P_i \cdot k_{од} - \sum_{i=1}^N n_i \cdot P_{ri} \right), \quad (6)$$

где  $b_0, b_4$  – коэффициенты линейной аппроксимации, характеризующие затраты на модернизацию защиты и автоматики распределительной сети в связи с присоединением РГ;  $b'_5$  – плата за резервирование мощности, определяемая по договору с энергоснабжающей организацией, руб/кВт;  $n_p$  – количество блоков максимальной мощности, которое нужно резервировать;  $b'_3$  – плата за присоединение нагрузки к сети, руб/кВт;  $k_{од}$  – коэффициент одновременности;  $P_i$  – максимальная мощность нагрузки в  $i$ -м узле, кВт;  $P_{zmax}$  – мощность самого мощного блока в сети, кВт.

Коэффициенты  $b_0, b_3, b_5$ , могут принимать различные значения, в том числе и нулевые, в зависимости от получаемых результатов. Для учёта этого используются логические выражения следующего вида:

$$b'_5 = \text{if} \left( \sum_{i=1}^N n_i = 0, 0, b_5 \right), \quad (7)$$

учитывающие ситуацию, когда в ходе расчёта выявлена нецелесообразность установки в сети генераторов.

Кроме капитальных вложений, модель должна учитывать годовые эксплуатационные затраты.

Стоимость потерь электроэнергии в сети 6–10 кВ будет выражаться в следующем виде:

$$C_1 = \sum_{j=1}^M (h_{1j} \cdot \Delta W_j), \quad (8)$$

где  $h_{1j}$  – тариф за электроэнергию в  $j$ -й интервал времени, руб/кВт·ч;  $\Delta W_j$  – потери электроэнергии в сети за год в  $j$ -й интервал времени, кВт·ч.

$$\Delta W_j = T \cdot \Delta P_j \cdot T_j, \quad (9)$$

где  $T$  – количество дней в году;  $\Delta P_j$  – потери мощности в сети 10 кВ в  $j$ -й интервал времени, кВт;  $T_j$  – длительность  $j$ -го интервала времени, час.

Потери мощности на  $j$ -м интервале суточного графика

$$\Delta P_j = \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{U^2} \sum_{i=1}^n R_i \cdot \left( \sum_{i'=1}^{n'} (P_i \cdot k_{ij} - n_{ij} \cdot P_{ri}) \right)^2, \quad (10)$$

где  $\text{tg} \varphi$  – коэффициент мощности в данной сети;  $U$  – номинальное напряжение сети, кВ;  $k_{ij}$  – коэффициент, показывающий какую часть от максимальной составляет средняя нагрузка за  $j$ -й промежуток времени в  $i$ -м узле;  $R_i$  – сопротивление ветви, питающей  $i$ -й узел, Ом;  $n_{ij}$  – количество генераторов находящихся в работе в  $i$ -м узле в  $j$ -й интервал времени;  $n'$  – количество узлов дерева, питаемых по  $i$ -й ветви.

Аналогичным образом можно выразить основные эксплуатационные затраты сети с распределённой генерацией.

Приведённые выражения позволяют однозначно определить целевую функцию  $F(\vec{P}, \vec{N})$ . Перебирая различные составляющие векторов  $\vec{P}$  и  $\vec{N}$  из возможных, ГА находит такие их значения, при которых  $F(\vec{P}, \vec{N}) \rightarrow \min$ .

При решении задачи должен удовлетворяться ряд ограничений.

Ограничение по количеству и мощности резервных блоков:

$$\sum_{i=1}^N n_{pi} \cdot P_{ri} \leq 2 \cdot P_{rmax}. \quad (11)$$

Ограничение сечения питающих кабелей 0,4 кВ по длительно допустимому току:

$$a_1 + a_2 \cdot \frac{I_i}{m_i} + a_3 \cdot \left( \frac{I_i}{m_i} \right)^2 \leq S_i, \quad (12)$$

где  $m_i$  – количество параллельных кабелей в  $i$ -м узле, шт;  $S_i$  – сечение кабеля 0,4 кВ в  $i$ -м узле, мм<sup>2</sup>.

Ограничение мощности станции по пропускной способности трансформаторов 10/0,4 кВ:

$$P_{ri} \cdot (n_{ij} + n_{pi}) - k_{ij} \cdot P_i \leq P_{пр}. \quad (13)$$

Ограничение на выдачу во внешнюю сеть:

$$\sum_{i=1}^N P_{ri} \cdot n_{ij} \leq \sum_{i=1}^N P_i \cdot k_{ij} + \Delta P_j + \Delta P_{j-0,4}, \quad (14)$$

где  $\Delta P_{j-0,4}$  – потери мощности в сети 0,4 кВ в  $j$ -й интервал времени, кВт.

В соответствии с алгоритмом каждая новая особь проверяется на соответствие ограничениям. В случае нарушения ограничений особь отбраковывается и заменяется новой.

Представленный алгоритм был проверен на простейшей сети из пяти узлов, показанной на рис. 1. Результаты сравнивались с результатами, получаемыми методом прямого перебора вариантов. При этом количество возможных вариантов варьировалось изменением списка номинальных мощностей возможных к установке блоков. Оба

Затраты времени на расчёт простейшей сети

Число возможных вариантов, млн	Прямой перебор вариантов, с	Генетический алгоритм, с
0,0225	8	5
0,135	44	6,5
3,375	960	10
506,25	$1,4 \times 10^5$	20

метода дают абсолютно одинаковые результаты, хотя существенно отличаются по времени вычислений (см. таблицу)

Эффективность ГА зависит от применяемых настроек для каждого типа задач. При анализе рассмотренной сети поддерживался размер популяции в количестве 30 особей, каждой парой особей создавалось 10 потомков с вероятностью мутации 50%. Программа также позволяет изменять и другие параметры эволюции. При этом можно подобрать такие условия отбора и скрещивания, при которых решение задачи методом ГА будет максимально эффективным. Критерием останова в рассматриваемой задаче служило получение тех же результатов, что и при прямом переборе вариантов. В практических задачах критерием останова, как правило, является ограничение по времени решения.

#### Литература

1. Тарасенко, В.В. *Преимущества распределённой генерации и проблемы на пути её распространения* / В.В. Тарасенко, М.Е. Гольдштейн, Б.Г. Булатов // *Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: сборник докладов I Международной научно-практической конференции.* – Улан-Удэ, 2008.

2. Acharya, N. *An analytical approach for DG allocation in primary distribution network* / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulananthan // *Electric Power Systems Research.* – 2007. – № 1.

3. Тарасенко, В.В. *О применении метода перебора при поиске оптимального числа и мощностей источников электроэнергии в сети с распределённой генерацией* / В.В. Тарасенко // *Сборник докладов I научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ.* – 2009.

4. Охорзин, В.А. *Оптимизация экономических систем: учебное пособие* / В.А. Охорзин. – М.: Финансы и статистика, 2005.

5. Гладков, Л.А. *Генетические алгоритмы* / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2006.

6. Тарасенко, В.В. *Принципы математического описания технико-экономических показателей распределённой генерации* / В.В. Тарасенко // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сборник трудов Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов.* – Тольятти, 2009.

7. *Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей* // *Некоммерческое партнёрство «Российское тепло-снабжение»: отчёт.* – М., 2004. – Ч. II.

8. Christopher Asir Rajan C. *An evolutionary programming based simulated annealing method for solving the unit commitment problem* / C. Christopher Asir Rajan, M.R. Mohan // *Electrical Power and Energy System.* – 2007. – №29.

9. <http://np-soft.ru/main/index.htm>.

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

**Тарасенко Виктор Викторович.** Аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ. Окончил Оренбургский государственный университет в 2007 г. по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий и городов». Область научных интересов: распределённая генерация, оптимизационные модели, энергоэффективность.

Контактный телефон: 8-(351)267-92-41.

**Tarasenko Viktor Viktorovich** is a post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems Department of South Ural State University. In 2007 he graduated from Orenburg State University, specialty Industrial and Municipal Power Supply. Research interests: distributed generation, optimization models, energy efficiency. Contact phone: 8-(351)267-92-41.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП ПО ДАННЫМ ТЕЛЕМЕТРИИ

Л.А. Беляева, Б.Г. Булатов  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## IDENTIFICATION OF THE TRANSMISSION LINES PARAMETERS ACCORDING TO THE TELEMETRY DATA

L.A. Belyaeva, B.G. Bulatov  
Chelyabinsk, SUSU

Исследованы возможности оценки поперечной проводимости ЛЭП по данным телеметрии для повышения точности расчета потерь на корону. Приведены результаты оценки методом случайного поиска.

*Ключевые слова:* электрические сети, потери на корону, телеметрия, случайный поиск.

The assessment opportunities of transmission lines shunt admittance according to the telemetry data with the purpose of the increase of the corona losses calculation accuracy are analyzed. The assessment results by the random search method are given.

*Keywords:* electrical networks, corona losses, telemetry, random search.

Анализ отчетных данных и динамики потерь электроэнергии по электрическим сетям АО-энерго (РСК) России показывает, что суммарный уровень потерь по стране в 2005 г. достигал 112,6 млрд кВт·ч, или 12,86 % от отпуска электроэнергии в сеть, что в 2–2,5 раза превышает уровень потерь в промышленно-развитых странах [1]. В настоящее время во всех электросетевых компаниях разработаны и реализуются программы по снижению потерь электроэнергии. С каждым годом требования к снижению потерь ужесточаются. Так ОАО «ФСК ЕЭС» по итогам 2006 года снизило потери электроэнергии в собственных сетях на 0,04 процентных пункта (с 3,75 % до 3,71 % к отпуску из сети). Улучшения ситуации с потерями электроэнергии удалось добиться и в распределительном сетевом комплексе. Потери электрической энергии в 2006 году составили 8,7 % от отпуска в сеть. Для сравнения в 2005 году потери электроэнергии в распределительных сетях составляли 10,11 %.

Сокращение технических потерь электроэнергии стало возможным благодаря замене перегруженного оборудования (силовых трансформаторов, воздушных линий электропередачи), сокращению сроков ремонтов, повышению пропускной способности сети, оптимизации схем распределения электрической энергии и режимов работы электрических сетей, снижению расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций [2]. Также снижению потерь в сетях способствует установка новых систем учета электрической энергии, соответствующих современным требованиям.

Для выбора эффективных мероприятий по экономии электроэнергии при передаче важно достоверно определить структуру потерь электроэнергии. В магистральных сетях, в состав которых входят линии напряжением 220 кВ и выше, заметная доля приходится на потери на корону, которые во многом зависят от погодных условий и поэтому контролируются и прогнозируются с низкой точностью. В связи с внедрением в этих сетях новых систем контроля параметров режима с 12-разрядными АЦП вместо 8-разрядных появляется возможность и возрастает актуальность использования телеметрии для повышения точности учета потерь электроэнергии на корону.

Так как внедрение современных систем телемеханики и учета, информация которых может быть использована для реальной оценки потерь, в настоящий момент ведется и еще не завершено в полной мере, рассмотрим виртуальную модель линии. Для расчета и анализа режима воспользуемся П-образной схемой замещения ЛЭП-500 кВ длиной 200 км, выполненной проводом 3хАС-400/51. Передаваемая мощность  $P_1=600$  МВт,  $Q_1=100$  МВАр. Используя справочные данные для провода указанного сечения, определены параметры схемы замещения:  $R=4,86$  Ом,  $X=61,2$  Ом,  $B/2=3,623 \cdot 10^{-4}$  См, активная проводимость определяется для разных погодных условий по формуле

$$G = P_k / U_n^2 \cdot L,$$

где  $P_k$  – удельные потери на корону.

На рис. 1 показана фронтальная панель виртуального устройства (ВУ). На схеме передачи приведены точные расчетные значения параметров

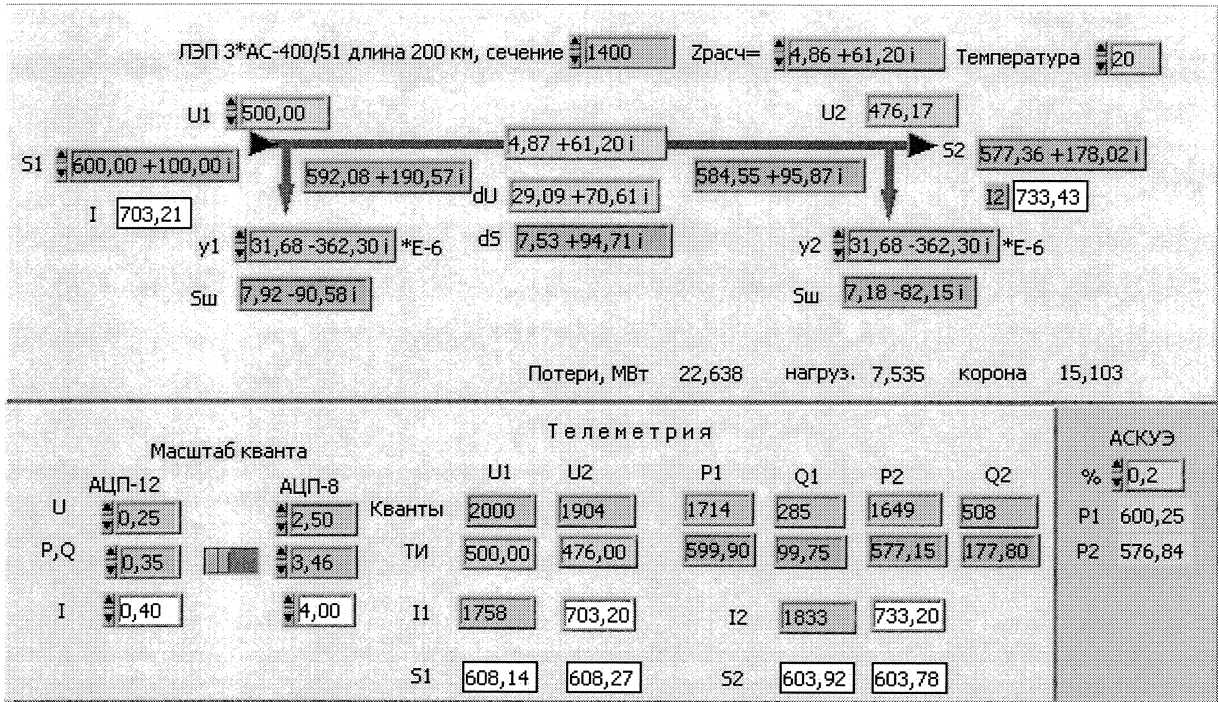


Рис. 1. Фронтальная панель ВУ

режима по всем элементам схемы замещения. В нижней части панели представлены результаты формирования телеметрии по всем параметрам режима ( $U, I, P, Q$ ) в начале и конце передачи. Здесь можно выбрать разрядность АЦП, установить масштабы квантов, определить число квантов по каждому параметру и значения всех параметров режима в оперативно-информационном комплексе пункта управления. В нижней строке приведены значения полной мощности, найденные расчетом по формулам для начала и конца передачи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}UI.$$

Совпадение результатов при этом является признаком корректности телеметрии.

С помощью ВУ можно проанализировать влияние напряжения на потери в линии при различных погодных условиях, для которых в справочниках приводятся удельные потери на корону для разных типов проводов и напряжений. Оценки потерь задаются для хорошей погоды, сухого снега, влажной погоды, изморози и в кВт/км приняты равными, соответственно,  $P_{кх.} = 2,4, P_{кв} = 9,1, P_{кв} = 30,2$  и  $P_{ки} = 79,2$ .

Полученные зависимости показаны на рис. 2. Характер зависимостей объясняется следующим: при хорошей погоде или сухом снеге снижение суммарных потерь с ростом напряжения зависит главным образом от снижения нагрузочных потерь, так как влияние короны при таких погодных условиях незначительно. При влажной погоде потери на корону становятся соизмеримы с нагрузочными и минимум потерь лежит в допустимом диапазоне регулирования напряжения. При измо-

рози потери на корону значительно превышают нагрузочные и минимум потерь смещается в зону минимальных напряжений.

Таким образом, для оптимизации уровня напряжения в магистральных сетях необходимо по возможности точнее оценивать активную проводимость линий электропередач. Оптимизационные расчеты, в которых параметры расчетных схем замещения определены по паспортным данным без учета реальных внешних условий, не позволяют обеспечить максимальное снижение технических потерь энергии. Реальные параметры схем замещения будут несколько отличаться от справочных вследствие различных воздействий температуры, передаваемой мощности, влажности и т. д. Поэтому для оптимизации режима необходимо знать реальные параметры схемы замещения, получить которые возможно, имея достоверные параметры телеметрии по концам каждой ЛЭП эксплуатируемой магистральной сети.

На примере рассмотренной линии при напряжении  $U1=500$  кВ была проведена оценка чувствительности телеметрии к изменениям различных параметров схемы замещения. С этой целью в небольшом диапазоне менялись продольные сопротивления  $R+jX$  и в более широком поперечные проводимости  $G-jB$  и контролировалась телеметрия в конце передачи.

Для полученной выборки были определены коэффициенты парной корреляции, приведенные в таблице, значения которых подтвердили достаточно разную чувствительность контролируемых параметров режима в конце передачи к изменению параметров схемы замещения. Нулевые значения получаются в том случае, когда изменение пара-

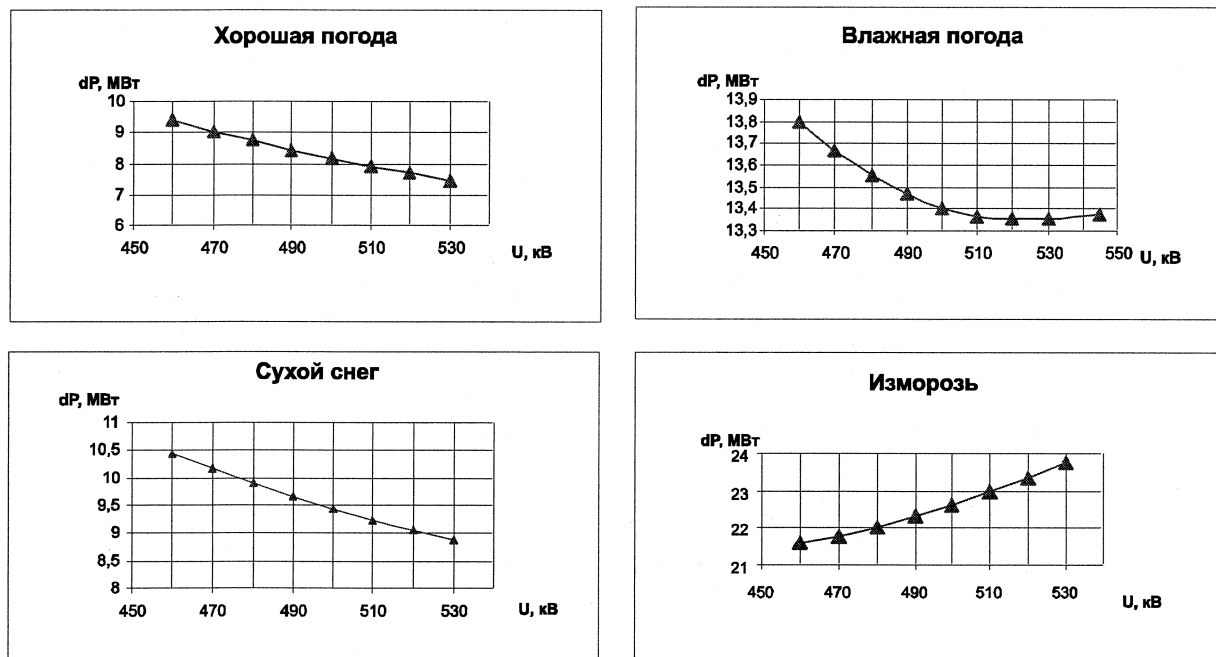


Рис. 2. Потери в ЛЭП при разных погодных условиях

метра режима лежит в пределах кванта и недостаточно для изменения их количества.

### Коэффициенты парной корреляции

ТИ	U2	P2	Q2	I2
R	-0,945	-0,866	0	0
X	-0,996	0	-1,000	-1,000
B	-1,000	-0,500	1,000	0,999
G	0	-0,338	0,992	-0,114

Таким образом, обладая данными достоверной телеметрии по концам передачи, можно сформулировать задачу на поиск таких значений параметров П, которые обеспечивают минимальную среднеквадратическую ошибку между телеметрией  $TI_{2i}$  и расчетными параметрами режима  $TI_i$  в конце передачи

$$F(\Pi) = \frac{1}{n} \sum_i (TI_{2i} - TI_i(TI_1, \Pi))^2 \rightarrow \min.$$

Решение этой задачи можно получить разными методами. Наиболее перспективными сегодня являются методы случайного поиска, открытые для различных модификаций. Эти методы относят к методам нулевого порядка, основанным на многократных расчетах целевой функции, начиная с исходной точки. Следующая точка на траектории спуска к решению определяется с помощью генератора псевдослучайных чисел с равномерным распределением в интервале 0...1.

Для проверки возможностей алгоритма случайного поиска была проведена идентификация параметров G и B поперечной проводимости ЛЭП-

500. При первом расчете в качестве телеметрии использовались точные значения параметров режима, т. е.  $TI_1=500; 600; 100; 703,21$ ;  $TI_2=476,17; 577,36; 178,02; 733,43$ . В качестве исходного приближения принимались значения  $G=5 \cdot 10^{-6}$ ,  $B=350 \cdot 10^{-6}$ . Ребро квадрата с центром в текущей точке принималось в диапазоне от 0,1 до 0,02. При точности оценки проводимости в 1% число просмотренных случайных точек менялось от 1200 до 3000, из них количество полезных шагов составляло около 40%.

Аналогичные результаты получены и для телеметрии, показанной на рис. 1 при 12-разрядном АЦП для принятых масштабов квантования. Телеметрия, полученная в устройствах телемеханики с 8-разрядными АЦП, не имеет перспектив для использования в рассматриваемой задаче.

Таким образом, использование корректной телеметрии, проверенной на отсутствие неверных измерений в параметрах режима по концам ЛЭП, позволяет определять с достаточной точностью активную проводимость при разных погодных условиях. Контроль при этом влажности, температуры и других характеристик погоды даст возможность набрать статистику, обработка которой позволит повысить точность оценки потерь электроэнергии на корону в структуре технических потерь и при оптимизационных расчетах.

### Литература

1. Воротницкий, В.Э. Основные направления снижения потерь электроэнергии в электрических сетях на краткосрочную и долгосрочную перспективу / В.Э. Воротницкий // Энергосистема: управ-

ления, конкуренция, образование: материалы 3-й международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2008.  
2. Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормиро-

вание потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.

Поступила в редакцию 15.01.2010 г.

**Булатов Борис Георгиевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: управление и оптимизация режимов энергосистем. Контактный телефон: 8-(351)267-92-46.

**Bulatov Boris Georgievich** is Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Electric Power Plants, Networks and Systems Department of South Ural State University. Research interests: management and optimization of power systems modes. Tel: 8-(351)267-92-46.

**Беляева Лариса Александровна** – преподаватель кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ. Научные интересы связаны с оборудованием и режимами работы электроустановок. Контактный телефон: 8-(351)267-92-46.

**Belyaeva Larisa Aleksandrovna** is a lecturer of the Electric Power Plants, Networks and Systems Department of South Ural State University. Research interests are related to the equipment and operation modes of electrical installations. Tel: 8-(351)267-92-46.

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 674:658.567.1

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ДРЕВЕСНОГО ОПИЛА И ГРАНУЛ, ПРОПИТАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

*Н.А. Филина, С.Я. Алибеков  
г. Йошкар-Ола, МГТУ*

## RESEARCH IN DEFINITION OF WOOD SAWDUST HEAT PICK OUT WHEN IT IS OIL RICH

*N.A. Filina, S.J. Alibekov  
Yoschar-Ola, Mary State Technical University*

Предложена технология утилизации древесных отходов, пропитанных нефтепродуктами, изучен процесс горения на древесных гранулах и на опиле различных пород деревьев как чистых, так и пропитанных нефтепродуктами, рассчитана теплотворная способность этих образцов. Разработана математическая модель процесса горения древесных отходов как чистых, так и пропитанных нефтепродуктами в программной среде Curve Expert 1.3.

*Ключевые слова:* древесные отходы, сорбция, тепловая энергия, моделирование в Curve Expert 1.3.

We suggest the technology of recycling of oil rich wood waste. The process of combustion is studied on wood-particles of different tree species, both oil rich and oil free. Also the combustion warmth was calculated. On the in program Curve Expert 1.3 was made the mathematical model of oil rich and oil free hood scrap combustion process.

*Keywords:* wood saw, sorption, thermal energy, modelling in Curve Expert 1.3.

В настоящее время в качестве топлива в основном используются невозобновляемые энергоресурсы органического происхождения. В связи с энергетическим кризисом особое внимание уделяется вторичным альтернативным источникам энергии, в том числе биоресурсам и различным продуктам промышленной переработки.

В Марий Эл находятся крупнейшие деревообрабатывающие комбинаты Поволжья, где образуется большое количество древесных отходов, в том числе и опил, который можно использовать как вторичное сырье в виде брикетов для получения тепловой энергии [1, 2, 3].

Для эффективного процесса брикетирования опилок нужны связующие материалы, которыми могут быть нефть и нефтепродукты, попавшие в водные объекты. Опил, обладая высокой сорбционной способностью, способствует удержанию нефтепродуктов, что позволяет с меньшими усилиями спрессовывать опил в брикеты. Полученные брикеты по теплотворной способности и экологичности сгорания превосходят брикеты с другими связующими веществами.

Нами были проведены исследования по определению теплотворной способности опила и гранул, полученных из разных пород дерева, насыщенных нефтепродуктами.

Исследования проводились на базе ГУ СЭУ ФПС ИПЛ по РМЭ в г. Йошкар-Оле. Сжигание образцов древесных опилок и гранул проводили по ГОСТ 12.1.044-89 [4].

Были подготовлены опытные образцы березовых, сосновых опилок и древесных гранул, полученные на пилораме Марийской лесотехнической школы. Рассмотрены процессы горения как чистых опилок и гранул, так и пропитанных в течение 48 часов нефтепродуктами.

Исследования проводили на приборе ОТМ [4]. Для измерения температуры газообразных продуктов горения использовали термоэлектрический преобразователь с диаметром электродов 0,5 мм, рабочий спай которого располагали в центре зонда на расстоянии 15 мм от его верхней кромки. Регистрирующий температуру прибор потенциометр КСП-2 имел диапазон измерения от 0 до 600 °С, класс точности не ниже 0,5. Для кон-



троля массы образцов использовали аналитические лабораторные весы с наибольшим пределом взвешивания 500 г, погрешностью измерения не более 0,1 г.

Испытания проводили в мешочках из стеклоткани, сшитых металлическими скрепками, весом 4,1 г каждый. Мешочки заполняли как чистыми, так и загрязненными нефтепродуктами, березовыми, сосновыми опилками и гранулами с относительной влажностью 12 %. Вес готовых образцов составлял по 50 г каждый. Предварительно подготовленные образцы выдерживали в вентилируемом сушильном шкафу при температуре (60 ± 5) °С в течение 24 часов, затем охлаждали до температуры окружающей среды, не вынимая их из шкафа. Образцы высушивали для более точного определения теплотворной способности, поскольку теплотворная способность увеличивается с уменьшением уровня влажности. Подготовленные образцы закрепили вертикально в держателе с помощью металлической проволоки.

Внутренняя поверхность реакционной камеры перед испытанием была покрыта двумя слоями алюминиевой фольги толщиной до 0,2 мм, которую по мере прогорания или загрязнения продуктов горения заменяли на новую.

Держатель с испытуемым образцом вводили в камеру за 5 с до начала испытания и выдерживали

до достижения максимальной температуры отходящих газообразных продуктов горения опилок, затем горелку выключали. Образец выдерживали в камере до полного остывания (20 °С). Остывший образец извлекали из камеры и взвешивали, определяя зольный остаток.

Результаты измерений температуры отходящих газов чистого опила и древесных гранул, а также того же опила, но с нефтепродуктами представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 1–5.

Данные измерения подвергали статистической обработке в программной среде Curve Expert 1.3. Доверительные интервалы и критерии Фишера  $S$  – сумма квадратов отклонений;  $r$  – коэффициент корреляции [5].

Особенности процессов горения опила, изучены ранее и рассмотрены в работах [6–8].

При температуре 200 °С начинается плавление и конденсация ароматических ядер лигнина. При 180–300 °С происходит дегидратация целлюлозы с образованием несопряженных двойных связей и появление при 220 °С ароматических и конденсированных структур. При нагревании конденсация, сшивка с образованием углефицированных структур происходит параллельно с деструкцией, выделением летучих веществ (газообразных продуктов, смолы). Скорость выделения летучих

Таблица 1  
Результаты измерений температуры отходящих газов, образующихся при горении чистых образцов

Березовый опил		Сосновый опил		Древесные гранулы	
Время $\tau$ , с	Температура $t$ , °С	Время $\tau$ , с	Температура $t$ , °С	Время $\tau$ , с	Температура $t$ , °С
14	200	30	200	44	200
20	250	53	250	100	250
30	300	65	300	157	300
36	350	75	350	215	350
45	400	90	400	245	400
140	450	130	450	276	450
160	400	185	500	330	500
175	500	215	450	360	450
195	450	265	400	363	400
258	400	328	350	370	350
280	350	332	300	385	300
295	300	342	250	415	250
313	250	365	200	475	200
340	200	–	–	555	150
–	–	–	–	780	100

Таблица 2  
Результаты измерений температуры отходящих газов, образующихся при горении образцов с нефтепродуктами

Березовый опил с нефтепродуктами		Сосновый опил с нефтепродуктами	
Время $\tau$ , с	Температура $t$ , °С	Время $\tau$ , с	Температура $t$ , °С
4	200	5	200
35	600	37	600
355	500	470	500
454	350	480	350
650	200	575	200

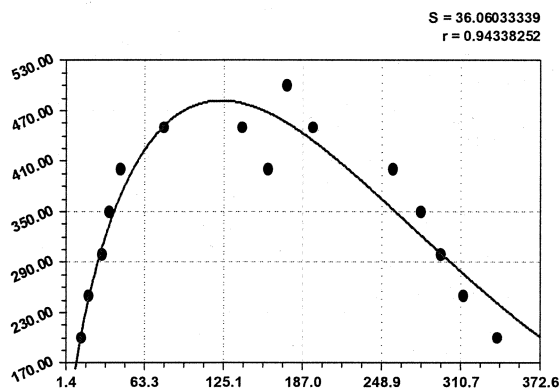


Рис. 1. Скорость изменения температуры отходящих газообразных продуктов горения березовых опилок

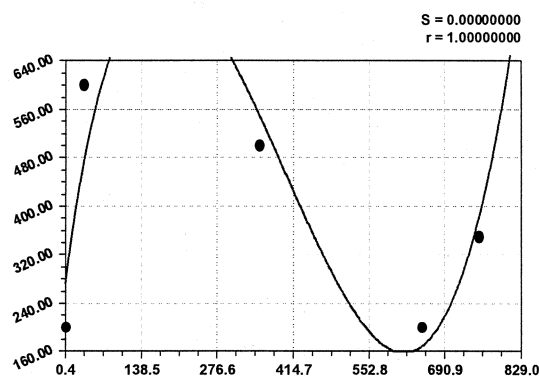


Рис. 2. Скорость изменения температуры отходящих газообразных продуктов горения березовых опилок с нефтепродуктами

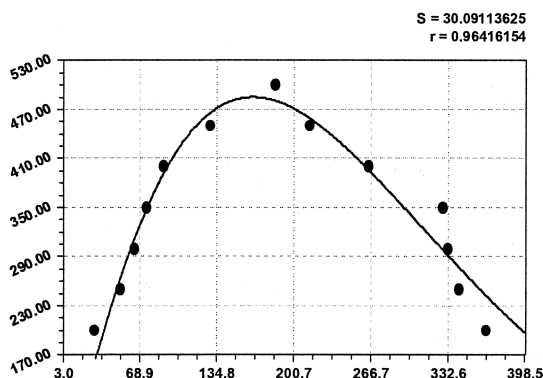


Рис. 3. Скорость изменения температуры отходящих газообразных продуктов горения сосновых опилок

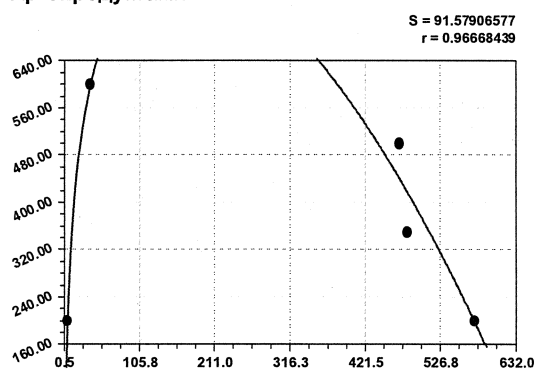


Рис. 4. Скорость изменения температуры отходящих газообразных продуктов горения сосновых опилок с нефтепродуктами

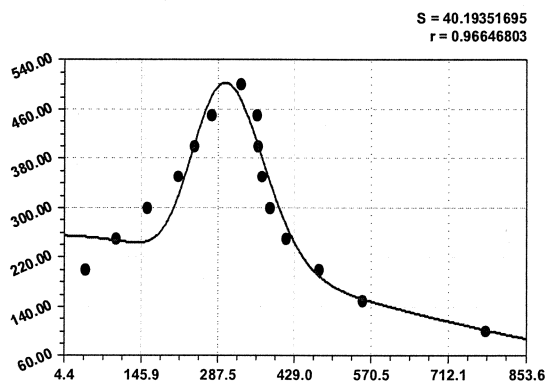


Рис. 5. Скорость изменения температуры отходящих газообразных продуктов горения древесных гранул

веществ увеличивается с повышением температуры. Этот процесс может быть несколько растянут во времени из-за большого разнообразия летучих веществ, различных по своему химическому составу и температуре воспламенения. Сначала происходит разложение гемицеллюлозы (200–260 °С) и затем, при более высокой температуре, разложение целлюлозы (240–350 °С) и лигнина (280–500 °С). За пределом 300 °С обычная структура древесины исчезает, уступая место конденсированным системам с известной степенью ориентации. При дальнейшем нагревании до 350 °С углеродизированных структур образуется уголь.

При температуре 400–500 °С наблюдается низкая скорость выхода летучих веществ, определяемая процессом разложением лигнина, происходящим в пределах всего температурного диапазона, но вызывающего наибольшие потери основного веса при более высоких температурах.

Наибольшую температуру горения имеют твердые компоненты топлива, которые остаются после удаления летучих веществ. Как правило, эти компоненты имеют углеродную основу и сгорают при температурах 650–700 °С. Процесс горения твердых компонентов сопровождается большим количеством выделяемого тепла.

Результаты проведенных испытаний показали, что максимальная температура отходящих газообразных продуктов горения березовых и сосновых опилок, древесных гранул составляет 500 °С, опила, пропитанного нефтепродуктами, – 600 °С.

После выключения горелки по достижению максимальной температуры отходящих газов происходит самостоятельное горение образцов, постепенное затухание процесса горения и образованием зольного остатка. При сжигании образцов с березовым опилом масса образовавшейся золы составляет 0,2 г или 0,44 % от первоначальной массы образца; опилок, пропитанных нефтепродуктами, – 2,1 г или 1,58 %.

При сжигании образца с сосновыми опилками масса образовавшейся золы составляет 0,45 г или 0,98 % от первоначальной массы образца; опилок, пропитанных нефтепродуктами, – 1,55 г или 0,93 %.

После выключения горелки процесс горения древесных гранул в 1,3 раза дольше по времени, чем горение опилок. Это связано с высокой удельной плотностью древесных гранул 1300–1400 кг/м<sup>3</sup>, по сравнению с плотностью сосновых (500 кг/м<sup>3</sup>) и березовых (630 кг/м<sup>3</sup>) опилок [9]. Масса образовавшейся золы 0,3 г.

Нами были получены математические модели процесса горения с использованием биотехнического устойчивого закона [5].

Для березового опила

$$t = 49,1588\tau^{0,55728} \exp(-0,00046115\tau^{1,40507}). \quad (1)$$

Для березового опила с нефтепродуктами

$$t = 4492,1878 \exp(0,00182\tau) - 0,24679\tau^{1,64193} - 4222,7993, \quad (2)$$

где  $t$  – температура отходящих газообразных продуктов горения материала, °С;  $\tau$  – время горения, с.

Для соснового опила

$$t = 5,10447\tau^{1,033439} \exp(-0,00049888\tau^{1,42531}). \quad (3)$$

Для соснового опила с нефтепродуктами

$$t = -1457,4302 \exp(0,001154\tau) + 990,8744\tau^{0,1535} + 397,0668. \quad (4)$$

Для древесных гранул

$$t = 254,84033 \exp(-1,57499\tau^{1,64785}) + 9,55228\tau^{16,98817} \exp(-0,0076768\tau^{1,30188}). \quad (5)$$

Была определена теплотворная способность опила, пропитанного нефтепродуктами, с учетом теплоты сгорания нефтепродуктов:

$$Q = \frac{m_{\%} \cdot Q_n^p}{100},$$

где  $Q$  – теплотворная способность смеси;

$m_{\%}$  – процентное содержание массы в смеси;

$Q_n^p$  – низшая теплота сгорания, МДж·кг<sup>-1</sup>.

$Q_n^p = 41,87$  МДж/кг – для нефтепродуктов,

$Q_n^p = 13,8$  МДж/кг – для древесины ( $W = 14\%$ ) [10].

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Сравнительная характеристика сорбционной способности различных сорбентов, приведена в табл. 4 [11]. Важная особенность всех представленных в таблице сорбентов – это их плавучесть, аналогичная нефти и нефтепродуктам.

#### Выводы

1. Установлено, что теплотворная способность опила, пропитанного нефтепродуктами, в 2,5 раза выше, чем у чистого.

2. Температура сгорания опилок березы и сосны как пропитанных, так и непропитанных совпадают, и время сгорания составляет 35 с и 180 с, соответственно, а у гранул время сгорания – 350 с.

3. Опил можно использовать как сорбент

Таблица 3

Результаты расчета образцов, пропитанных нефтепродуктами

Материал	Масса вещества, г	Кол-во нефтепродуктов (масло), мл	Масса образцов ч/з 48 часов, г	Процентное содержание нефтепродуктов в образце	Масса золы, г	Низшая теплота сгорания $Q_n^p$ , МДж/кг	Теплота сгорания, МДж/кг, [10]
Опил березы	45,9	105	133,15	65,5	2,10	32,13	13,8
	45,9	105	134,05	65,8	2,30		
	45,9	105	132,80	65,4	1,80		
Опил сосны	45,9	130	166,30	72,4	1,55	34,20	13,8
	45,9	130	165,70	72,3	1,35		
	45,9	130	166,90	72,5	1,85		
Опил сосны/березы 1:1	45,9	130	159,1	71,2	1,95	33,83	13,8
	45,9	130	159,85	71,3	2,10		
	45,9	130	158,70	71,1	1,80		
Древесные гранулы	45,9	65	64,40	28,7	0,25	23,41	17,5
	45,9	65	63,90	28,2	0,20		
	45,9	65	64,70	29,1	0,30		

Характеристика сорбентов нефти и нефтепродуктов

Сорбент	Коэффициент нефтепоглощения	Время впитывания, с	Плавуемость	Эффективность очистки, %
Резиновая крошка	1:4	60	Не тонет	92
Текстильный горошек	1:16	60	Не тонет	99,98
Пенополиуретан	1:0,7	–	Не тонет	98,93
Перлит	1:6	30	Не тонет	83
Опилки сосновые	1:4	30	Не тонет	82,5
Опилки березовые	1:3			
Шелуха овса	1:1	30	Не тонет	67

для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов и как вторичный ресурс для получения тепловой энергии.

#### Литература

1. Гринин, А.С. Промышленные и бытовые отходы: Хранение, утилизация, переработка / А.С. Гринин, В.Н. Новиков. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 336 с.

2. Рустамов, Н.А. Биомасса – источник энергии / Н.А. Рустамов, С.И. Зайцев, Н.И. Чернова // Энергия: электроника, техника, экология. – 2005. – № 6. – С. 20–27.

3. Перспективы и проблемы использования биомассы и отходов для производства тепла и энергии / Г.А. Рябов, Д.С. Литун, Э.П. Дик, К.А. Земсков // Теплоэнергетика. – 2006. – №7. – С. 61–66.

4. ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения».

5. Мазуркин, П.М. Математическое моделирование. Идентификация однофакторных статистических закономерностей: учебное пособие / П.М. Мазуркин, А.С. Филонов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. .

6. Древесный уголь. Получение, основные

свойства и области применения древесного угля / О.В. Бронзов, Г.К. Уткин, А.Н. Кислицын и др. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 137 с.

7. Попова, Л.Г. Исследование некоторых вопросов механизма образования древесного угля: автореф. / Л.Г. Попова. – Л.: Лесотехническая академия им. С.М. Кирова, 1970. – 15 с.

8. Никитин, Л.Г. Химия древесины и целлюлозы / Л.Г. Никитин. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 711 с.

9. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденев. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.

10. НПБ 105-95 ГУГПС МВД России «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности» (приказ № 32 от 31.10.95 г.).

11. Воробьев, Ю.Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов. – М.: Ин-октаво, 2005. – 368 с.

12. Дунаев, К.Н. Эколого-экономическая оптимизация производства древесных гранул из отходов лесопромышленного комплекса / К.Н. Дунаев, Б.В. Ермоленко // Экологическая безопасность. – 2009. – № 1. – С. 24–30.

Поступила в редакцию 27.11.2009 г.

**Филина Наталья Александровна** – старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Марийского государственного технического университета, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – комплексное использование лесных ресурсов, исследования процессов сорбции нефтепродуктов, получение тепловой энергии.

Контактный телефон: 8-903-326-46-39. E-mail: nata-filina@yandex.ru

**Filina Natasha Aleksandrovna** – the senior on the «security of life and activity» department, in Mary State Technical University, Yoschar-Ola town. The science interest area – complex use of forest resources, process of oil products sorption research, heart energy reception.

Contact phone: 8-903-326-46-39. E-mail: nata-filina@yandex.ru

**Алибеков Сергей Якубович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Машиностроения и материаловедения Марийского государственного технического университета, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – утилизация промышленных отходов и сточных вод, получение тепловой энергии, композиционные материалы, термическая обработка сталей. Контактный телефон: (8362) 68-68-01.

**Alibekov Sergey Jakubovich** – Doctor in technical science, professor, the head of «Mechanical engineering and material searching» faculty in Mary State Technical University, Yoschar-Ola town. The science interest area – industrial scraps and sewage water utilization, making heat energy, using additional materials, steel thermal processing. Contact phone: (8362) 68-68-01.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ И АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ЮУрГУ

*В.И. Панферов, С.В. Панферов  
г. Челябинск, ЮУрГУ*

## AUTOMATED CONTROL AND ANALYZ THERMAL REGIME OF THE BUILDING CHEMISTRY DEPARTMENT SUSU

*V. Panferov, S. Panferov  
Chelyabinsk, SUSU*

Описывается разработанная система контроля теплового режима здания химического факультета ЮУрГУ. Анализируются особенности процесса теплоснабжения и качество регулирования температурного режима. Предлагается способ адаптации графика погодного регулирования к реальным характеристикам здания и его системы отопления.

*Ключевые слова:* тепловой режим, система контроля, температура, теплота, расход, график регулирования, алгоритм компенсации.

Describe a developed system of control of the thermal regime of the building chemistry department SUSU. Analyzed features of the process heat and the quality of temperature control. A method is proposed to adapt the schedule of weather control to the real characteristics of the building and its heating system.

*Keywords:* heat treatment, control system, temperature, heat flow, schedule management, compensation algorithm.

Функциональная схема разработанной системы предусматривает контроль следующих параметров теплового режима:

- 1) температуры воды, поступающей в систему теплоснабжения здания после центрального теплового пункта (ЦТП) ЮУрГУ, работающего по графику «95/70»;
- 2) температуры обратной воды;
- 3) температуры воздуха в контрольной точке здания;
- 4) температуры наружного воздуха;
- 5) расхода воды на входе системы теплоснабжения;
- 6) тепловой мощности, потребляемой системой теплоснабжения здания.

В качестве датчиков температуры используются платиновые термометры сопротивления КТСПТВХ-В с номинальной статической характеристикой Pt500. Датчик температуры наружного воздуха закреплен на стене теплового пункта, датчик температуры внутреннего воздуха установлен на втором этаже, вблизи аудиторий 206, 207. В системе используется турбинный расходомер ВМГ-50 с «герконным» дистанционным выходным сигналом. Все указанные датчики подключаются к вычислителю «Эльф-03» со встроенной платой модуля контроля модема МСТИ.426477.07 ПС. Модуль контроля модема МСТИ.426477.07 ПС предназна-

чен для сопряжения вычислителя «Эльф-03» с модемом радиосвязи GSM «Siemens MC35i». Другой модем GSM «Siemens MC35i» установлен в аудитории лабораторного корпуса ЮУрГУ, закрепленной за кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, и подключен к ПК с программным обеспечением «Карат-Экспресс II» разработки НПП «Уралтехнология». Программа «Карат-Экспресс II» позволяет:

- по инициативе пользователя производить запрос содержимого архивов любого из подключенных приборов;
- представлять результаты запроса на дисплее в виде таблиц или графиков;
- сохранять их в файлах, экспортировать в форматы Excel 5.0, FoxPro DBF;
- вести базу данных посуточных значений параметров;
- выводить на печать в виде особым образом оформленных отчетных ведомостей;
- автоматически запрашивать текущие значения параметров.

Функциональная схема системы представлена на рис. 1. На этой схеме использованы стандартные обозначения средств измерения и автоматизации, применяемые при оформлении функциональных схем [1]. Монтаж технических средств системы контроля и настройка ее программного обеспе-

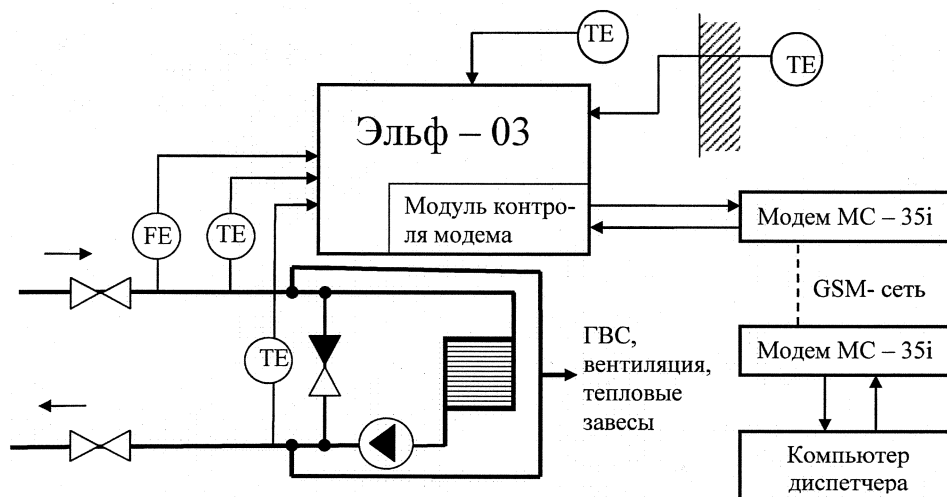


Рис. 1. Функциональная схема системы контроля теплового режима

чения выполнены сотрудниками ООО «Борей», г. Челябинск.

Заметим, что данная структура системы контроля обусловлена вынужденным использованием тех технических средств, которые штатно устанавливаются на абонентских вводах для учета всего теплоснабжения (после теплосчетчика до узла смешения собственно системы отопления осуществляется отбор теплоносителя на теплообменники ГВС, вентиляции и тепловых завес).

Режим индикации вычислителя «Эльф-03» «почасовой архив» содержит до 960 строк, что соответствует 40 суткам. В этом режиме для параметров «количество теплоты» и «расход» архивируются накопленные за час значения, т. е. мощность системы теплоснабжения, Гкал/ч и расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/ч. Для сигналов температуры индицируются средние за час значения. Отображение даты при обращении к суточному архиву производится в формате «день.месяц.час».

В режиме индикации «текущие данные» значения параметров «количество теплоты» и «рас-

ход» отображаются приведенными к одному часу, для сигналов температуры указываются мгновенные значения.

В режиме индикации «посуточный архив» указываются накопленные за сутки значения параметров «количество теплоты» и «расход», для сигналов температуры индицируются средние за сутки значения. Аналогичный формат индикации имеет место и в режиме «помесячный архив».

С помощью разработанной системы контроля осуществляется сбор экспериментальных данных для анализа и настройки алгоритма компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха.

Система автоматического управления режимом теплоснабжения здания построена на базе контроллера «Xenta» производства компании ТАС (Швеция) и имеет иерархическую структуру: погодный регулятор температуры подчинен регулятору температуры внутреннего воздуха. Функциональная схема системы регулирования температурного режима приведена на рис. 2.

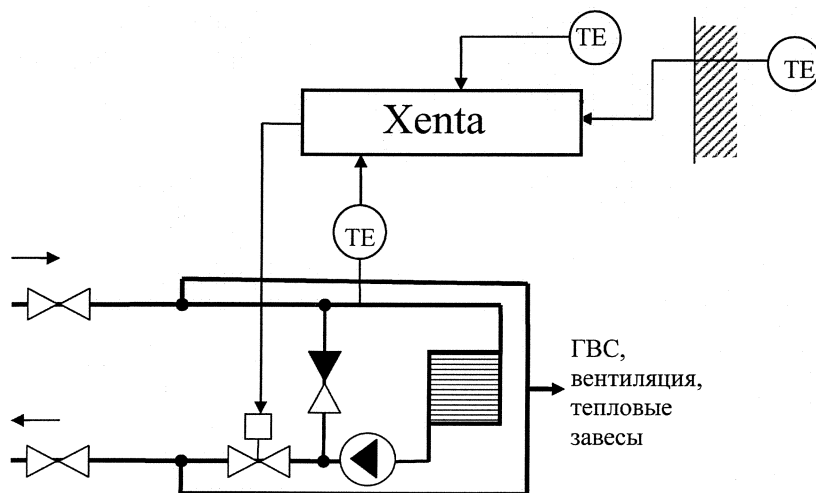


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования температурного режима

При этом у контроллеров «Xenta» так называемый график температуры подачи для погодного регулятора задается ломаной линией с помощью четырех точек, координаты которых указывают, какой должна быть температура теплоносителя на входе системы отопления при данной температуре наружного воздуха. Причем различаются отдельные режимы «день» и «ночь» (с 21:00 до 06:00 часов). Так, например, для г. Челябинска координаты точек графика подачи для режима «день» таковы:  $(-34; 95)$ ;  $(-10; 67)$ ;  $(0; 53)$ ;  $(20; 20)$ , где первая координата указывает температуру наружного воздуха, а вторая – температуру прямой воды. В целом система отопления здания химического факультета ЮУрГУ разделена на пофасадные части, каждая из которых управляется своим собственным контуром, реализуемым с помощью контроллера «Xenta».

Температура внутреннего воздуха измеряется в контрольных точках здания (в данном случае используются одна контрольная точка для северного и одна для южного фасадов), измеренное значение сравнивается с уставкой, уставка может быть задана разной для режимов «день» и «ночь», и в зависимости от результатов сравнения корректируется график температуры подачи. Коррекция осуществляется ПИД-регулятором, который, сравнивая уставку температуры внутреннего воздуха с его фактической температурой, вычисляет по ПИД-алгоритму величину коррекции температуры воды на входе системы отопления (задания для погодного регулятора), т. е., образно говоря, поднимает или опускает данную рабочую точку (и только ее) температурного графика (точку с абсциссой, соответствующей текущей температуре наружного воздуха). Допустимое значение размера коррекции указывается в настройках контроллера. При этом график температуры подачи в целом не изменяется и при выключении контура коррекции найденная регулятором величина коррекции обнуляется и управление режимом отопления осуществляется только в соответствии с этим графиком.

Недостатком данного подхода является то, что коррекция реализуется за счет использования весьма инерционного канала обратной связи [2], что, очевидно, затрудняет получение оптимальных показателей качества переходных процессов в данном контуре и во всей системе управления в целом. Кроме того, собственно сам график подачи никак не исправляется, не адаптируется к реальным условиям и характеристикам, его коррекция возможна только вручную. Отметим также, что при указанном подходе никак не учитывается имеющее место в реальных условиях непостоянство расхода воды собственно в системе отопления.

Поскольку завышенная температура обратной воды свидетельствует о сверхнормативном расходе воды на абонентский ввод, приводящем к ухудшению режима теплоснабжения других абонентов, то реализуется ограничение на этот параметр. Челябинские тепловые сети ограничивают

сверху данную температуру по следующему графику:  $(-34; 70)$ ;  $(-10; 52)$ ;  $(-1; 43)$ ;  $(20; 43)$ , где первая координата указывает температуру наружного воздуха, а вторая – температуру обратной воды. Если температура обратной воды превышает установленное данным графиком значение, то расход сетевой воды (вернее, воды, поступающей на абонентский ввод с ЦТП ЮУрГУ) на отопление автоматически снижается, увеличивается подмес до тех пор, пока не будет выполняться установленное для данной температуры наружного воздуха ограничение.

В связи с тем, что управление по мгновенной температуре наружного воздуха нецелесообразно [2], то производится усреднение сигнала температуры наружного воздуха, для этого в настройках контроллера задается время усреднения наружной температуры, обычно эта величина равна 60 минутам.

Разработанная система контроля позволила оценить качество работы вышеописанной системы автоматизации температурного режима здания. Анализ архива считываемых данных показал, что качество работы системы автоматизации нельзя признать эффективным: например, температура внутреннего воздуха в контрольной точке здания с 08.12.2009 г. по 31.12.2009 г. изменялась в диапазоне от  $22,40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $29,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кривые изменения температуры внутреннего (кривая 1) и наружного (кривая 2) воздуха в течение этого периода приведены на рис. 3.

Все эти данные свидетельствуют о том, что возмущения температурного режима, вызванные работой системы вентиляции, установленного оборудования, влиянием солнечной радиации, нестабильностью расхода теплоносителя собственно на нужды отопления и т. п., неудовлетворительно отрабатываются системой автоматизации и, прежде всего ее контуром коррекции графика температуры подачи по фактической температуре внутреннего воздуха. В принципе этого и следовало ожидать, так как инерционность канала обратной связи очень большая вследствие чего добиться высокого качества работы контура коррекции достаточно сложно. Очевиден также и отрицательный вклад в эти результаты и плохого графика температуры подачи: при отключении контура коррекции плохое качество поддержания заданного температурного режима обуславливается только плохим графиком подачи. В этих условиях вполне логично, что на первый план следует поставить решение задачи оптимизации графика температуры подачи при заданном расходе теплоносителя в системе отопления либо более общей задачи – отыскание общего алгоритма компенсации двух возмущений температурного режима здания: температуры наружного воздуха и расхода теплоносителя собственно в системе отопления. Так как данный канал регулирования «расход сетевой воды – температура теплоносителя на входе системы отопления» является малоинерционным, то при

хорошем графике подачи качество поддержания заданного температурного режима будет достаточно высоким. Это качество можно повысить еще и за счет хорошей настройки контура коррекции. Однако из-за инерционности канала обратной связи возможности повышения качества являются более ограниченными, чем в первом случае. Поэтому следует сначала решить первую задачу и лишь затем приступить к оптимизации настроек контура коррекции.

Анализ полученных данных также показал, что в некоторые промежутки времени температура воды, поступающей из ЦТП на абонентский ввод, заметно ниже той температуры, которая требуется по графику подачи. Для иллюстрации данной ситуации на рис. 4 приведены кривые изменения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе после ЦТП  $T_C$  и требуемой в соответ-

вии с графиком подачи, температуры на входе системы отопления  $T_{CO}$  для периода с 0 часов 01.01.2010 г. по 06 часов 09.01.2010 г.

Понятно, что в данном случае система управления работает так, что так называемый клапан отопления открыт полностью и подмеса обратной воды нет. Понятно также, что в данной ситуации, если график подачи соответствует действительным характеристикам здания и его системы отопления, то задача поддержания заданного значения температуры внутреннего воздуха  $t_B$  становится невыполнимой. По всей вероятности также и этим объясняется плохое качество регулирования температурного режима здания в некоторые моменты времени. На рис. 5 и 6 приведены полученные с помощью системы контроля кривые изменения расхода теплоты, температуры внутреннего и

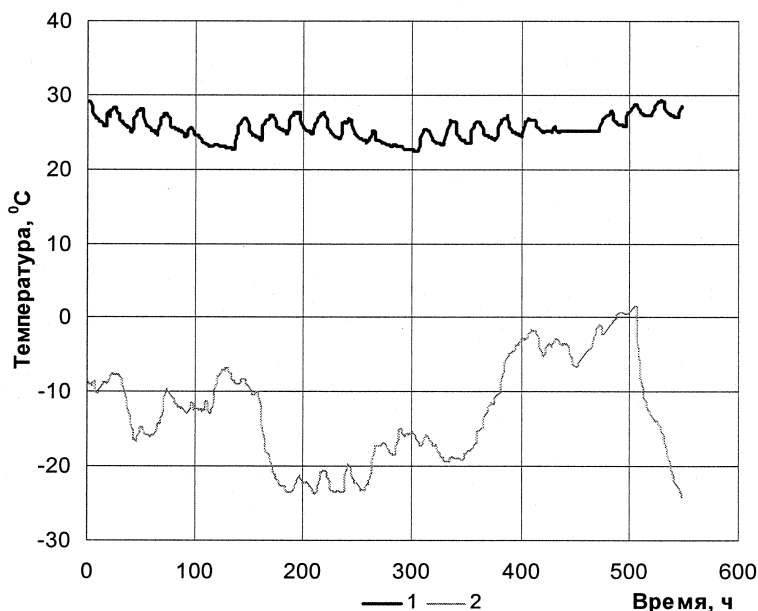


Рис. 3. Кривые изменения температуры внутреннего и наружного воздуха

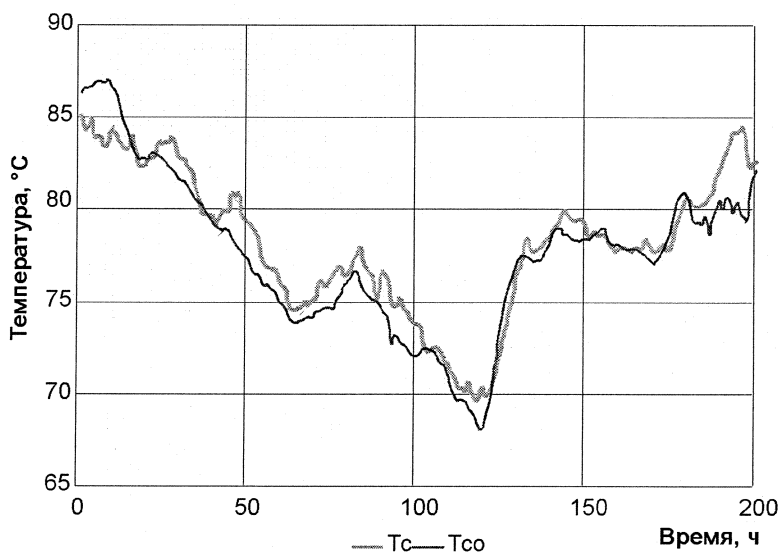


Рис. 4. Кривые изменения температуры теплоносителя



наружного воздуха в течение периода с 0 часов 01.01.2010 г. по 13 часов 08.01.2010 г. Анализ приведенных данных показал, что «выбросы» теплопотребления обусловлены большей частью включением в работу систем вентиляции, так, например, абсциссы двух граничных точек первого «выброса» таковы: 8:00 и 17:00 01.01.2010 г. Практически такие же временные точки рабочего дня характерны и для других «выбросов» теплопотребления. Кроме того, из графика следует, что расход теплоты на вентиляцию вполне соизмерим с ее расходом на отопление и даже превышает его большей частью. Анализ также показал, что система приточно-вытяжной вентиляции, по всей видимости, удовлетворительно сбалансирована, поскольку включение ее в работу, приводящее к резкому (более чем двукратному) увеличению потребляемой мощности, практически не влияет на температурный режим здания, на достигаемую температуру внутреннего воздуха.

Предлагаемый алгоритм компенсации основ-

ного возмущения температурного режима зданий – температуры наружного воздуха [3] имеет следующий вид:

$$t_{CO} = t_B \cdot \{1 + q_V V \cdot [0,5 / (cG_{CO}) + 1 / (kF)_{CO}]\} - q_V \cdot V [0,5 / (cG_{CO}) + 1 / (kF)_{CO}] \cdot t_H,$$

где  $t_{CO}$  и  $G_{CO}$  – соответственно температура и массовый расход воды на входе системы отопления,  $(kF)_{CO}$  – параметр, подлежащий определению при идентификации модели системы отопления и представляющий собой произведение коэффициента теплопередачи  $k$  на площадь поверхности теплообмена  $F$  для всей системы отопления (систему отопления здания представляем эквивалентным отопительным прибором),  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя,  $q_V$  – удельная тепловая характеристика здания,  $V$  – его объем,  $t_B$  и  $t_H$  – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха.

Для настройки этого алгоритма помимо счи-

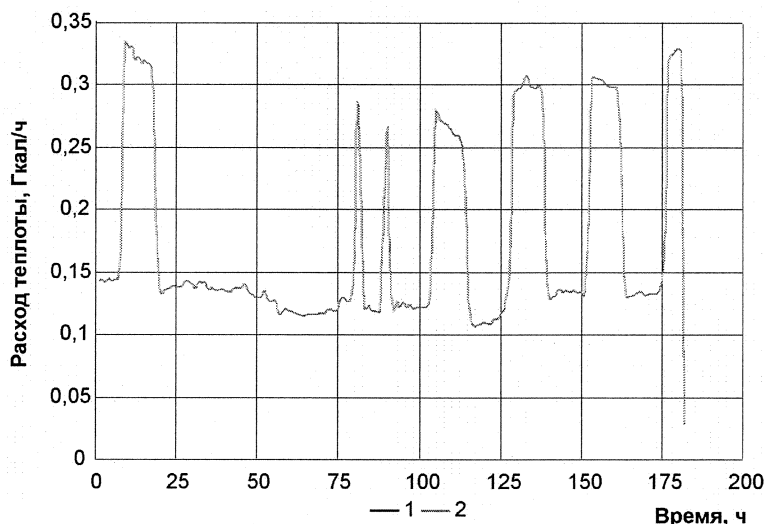


Рис. 5. Расход теплоты на абонентский ввод

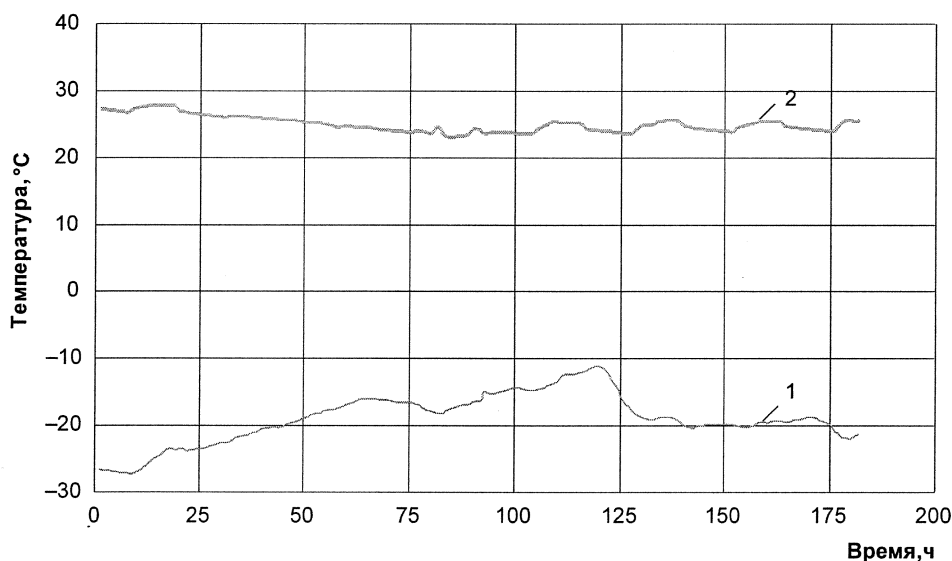


Рис. 6. Температура наружного (кривая 1) и внутреннего (кривая 2) воздуха

тываемой информации необходимы еще и экспериментальные данные о расходе теплоносителя собственно в системе отопления, о его температуре на входе системы отопления и о ее мощности. Напрямую эти данные системой контроля не представляются, однако возможность получения этих данных имеется, укажем, как это можно сделать.

Если отключить вентиляцию и ГВС (это реализуется в ночное время, а также в выходные и праздничные дни), то теплосчетчик будет регистрировать расход теплоты собственно на нужды отопления. В этом случае почасовой архив данных позволяет без каких-либо проблем определить фактическое значение удельной тепловой характеристики здания, для этого следует воспользоваться экспериментальными данными о расходе теплоты зданием  $Q$  при температурах внутреннего  $t_B$  и наружного воздуха  $t_H$ , полученными при отключенных системах вентиляции и ГВС, формулой Н.С. Ермолаева  $Q = q_V \cdot (t_B - t_H) \cdot V$  и методом наименьших квадратов.

Далее, что касается задачи получения экспериментальных данных о расходе теплоносителя собственно в системе и о его температуре  $t_{CO}$ , то эта задача решается так. При отключенном контуре коррекции по фактической температуре внутреннего воздуха и удовлетворительном потенциале теплоносителя, поступающего из ЦТП, температура воды на входе системы отопления  $t_{CO}$  с достаточной точностью выдерживается контроллером в соответствии с графиком подачи. Поэтому, зная температуру наружного воздуха  $t_H$  по графику подачи можно определить и  $t_{CO}$ . После этого расход теплоносителя собственно в системе отопления  $G_{CO}$  можно определить по соотношению  $G_{CO} = \frac{G_C \times (t_C - t_{OБП})}{(t_{CO} - t_{OБП})}$ , где  $G_C$  и  $t_C$  – соответственно расход теплоносителя и его темпе-

ратура до узла смешения,  $t_{OБП}$  – температура обратной воды. Данное соотношение нетрудно получить из уравнения теплового баланса и 1-го закона Кирхгофа, записанных для узла смешения системы отопления.

Системы отопления конструируются обычно так, что расход теплоносителя в них  $G_{CO}$  не меняется в процессе эксплуатации. Поэтому, если предположить, что это действительно имеет место и для системы отопления здания химического факультета, то уравнение (1) может быть переписано так:

$$t_{CO} - t_B = a \cdot (t_B - t_H),$$

где  $a = q_V V \cdot [0,5 / (cG_{CO}) + 1 / (kF)_{CO}] = \text{const}$ .

Если ввести обозначения  $y = t_{CO} - t_B$ ;  $x = t_B - t_H$ , то это уравнение переписывается в стандартном виде  $y = ax$ . Далее, решая задачу параметрической идентификации данного соотношения методом наименьших квадратов, по экспериментальным данным, полученным с помощью системы контроля для периода времени с 18 часов 01.01.2010 г., определили, что  $a = 1,189$ , т. е.  $y = 1,189x$ . Построив график прямой  $y = 1,189x$  и отметив на нем экспериментальные точки, обнаружили, что такую аппроксимацию сложно признать удовлетворительной, вместе с тем из графика было отчетливо видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо укладываются на прямую. Поэтому изменили структуру модели и стали считать, что  $y = a + bx$ . Тем же методом наименьших квадратов по тем же экспериментальным данным нашли, что  $y = 24,912 + 0,622x$ . На рис. 7 приведен график данной прямой  $y = 24,912 + 0,622x$  и соответствующие экспериментальные точки. При этом вычисленное значение коэффициента корреляции составило  $R_{yx} = 0,90$ , что вполне удовлетвори-

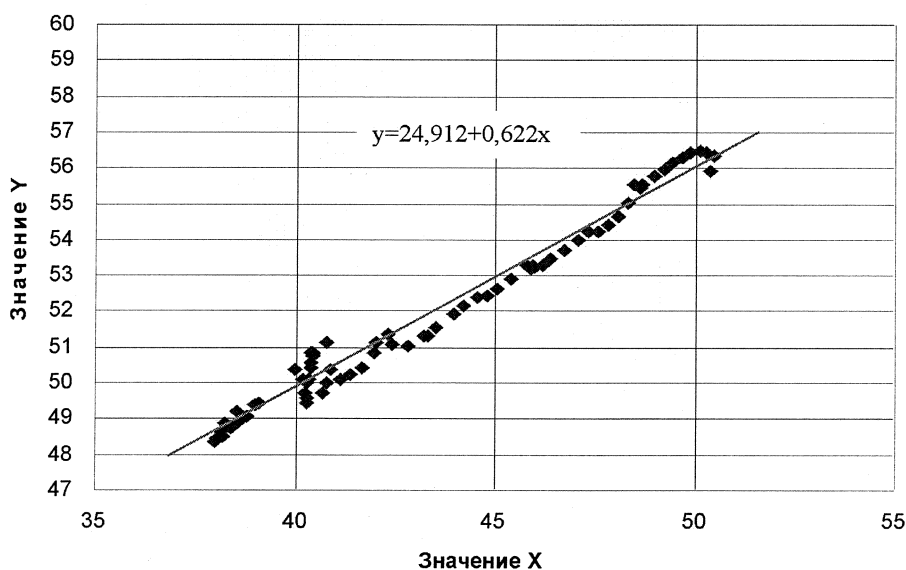


Рис. 7. Аппроксимация экспериментальных данных прямой  $y = a + bx$

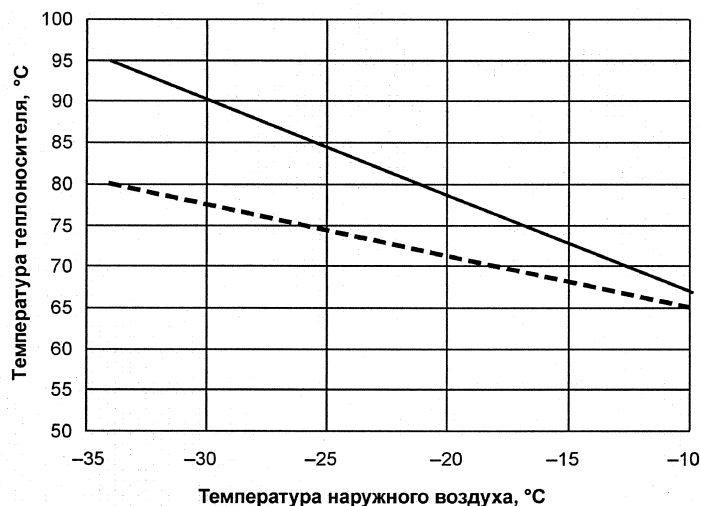


Рис. 8. Рекомендуемый ЧТС (сплошная линия) и адаптированный (штриховая линия) графики подачи

тельно и свидетельствует о хорошем качестве аппроксимации.

Если вернуться к прежним переменным, то получится, что аппроксимирующая зависимость имеет вид  $t_{CO} = 24,912 + 1,622t_B - 0,622t_H$ . Эта зависимость позволяет построить так называемый график подачи, адаптированный к реальным характеристикам здания и его системы отопления, этот график для  $t_B = 21^\circ\text{C}$  вместе с рекомендуемым Челябинскими тепловыми сетями (ЧТС) графиком подачи приведен на рис. 8.

При этом заметим, что не известно, на какое значение  $t_B$  рассчитан график ЧТС, обычно при построении таких графиков полагают, что  $t_B = 18^\circ\text{C}$  [4]. Тем не менее, даже в такой ситуации, как это видно из рис. 8, адаптированный график подачи располагается ниже графика ЧТС, следовательно, имеется реальная экономия теплоты. Заметим также, что графики (см. рис. 8) приведены только для температур наружного воздуха  $t_H \leq -10^\circ\text{C}$ , объясняется это тем, что использованные экспериментальные данные принадлежат именно этому диапазону. Поэтому, как это хорошо

известно, использование аппроксимирующей зависимости  $t_{CO} = 24,912 + 1,622t_B - 0,622t_H$  за пределами указанного диапазона не правомерно.

#### Литература

1. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное пособие / под ред. А.С. Ключева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 464 с.
2. Зингер, Н.М. Повышение эффективности работы тепловых пунктов / Н.М. Зингер, В.Г. Бестолченко, А.А. Жидков. — М.: Стройиздат, 1990. — 188 с.
3. Панферов, С.В. Адаптивная система управления тепловым режимом зданий / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VII Всероссийской научно-практической конференции. — Новокузнецк: СибГИУ, 2009. — С. 224–228.
4. Гершкович, В.Ф. Сто пятьдесят... Норма или перебор? (Размышления о параметрах теплоносителя) / В.Ф. Гершкович // Энергосбережение. — 2004. — № 5. — С. 14–19.

Поступила в редакцию 10.09.2009 г.

**Панферов Владимир Иванович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование и оптимизация технологических процессов и систем, автоматизация технологических объектов. Контактный телефон: (351) 267-96-88.

**Panferov Vladimir Ivanovich** — Dr.Sci.Tech., the professor managing faculty «Heat, gas and ventilation» SUSU. Area of scientific interests: modelling and optimization of technological processes and systems, automation of technological objects. Contact phone: (351) 267-96-88.

**Панфёров Сергей Владимирович** — аспирант кафедры «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование процессов в сложных системах управления. Контактный телефон: (351) 267-91-44.

**Panferov Sergey Vladimirovich** — Post-graduate student of student of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miass branch of SUSU. Scientific interests: simulation of processes in difficult control systems. Contact phone: (351) 267-91-44.

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.314

## ИНТЕГРИРУЮЩАЯ ИНТЕРВАЛО-КОДОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ РЕВЕРСИВНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Л.И. Цытович, А.В. Качалов  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## INTEGRATING INTERVAL-CODE SYNCHRONIZATION OF THE REVERSING THYRISTOR CONVERTORS

L.I. Tsitovich, A.V. Kachalov  
Chelyabinsk, SUSU

Рассматриваются принципы построения адаптивных к нестабильности напряжения сети каналов синхронизации реверсивного тиристорного преобразователя, выполненных на основе интервало-кодowego алгоритма обработки данных с выходов интегрирующих развертывающих преобразователей, синхронизированных с напряжением сети. Приведены структуры устройств синхронизации на основе трехразрядного двоичного счетчика и программируемой логической матрицы, а также временные диаграммы сигналов.

*Ключевые слова:* тиристорный преобразователь, адаптивная синхронизация, помехи сетевого напряжения, компаратор.

The principles of the adaptive to the line voltage instability synchronization channels of the reverse thyristor convertors made on the basis of interval-code processing algorithm of the integrating scanning convertors outputs which are synchronized with the line voltage are considered. The structures of the synchronizing devices on the basis of three-digit binary counter and programmable logic matrix as well as waveform diagrams are given.

*Keywords:* thiristor-based converter, adaptive synchronization, power source noises, comparator.

Применение методов интегрирующего развертывающего преобразования для синхронизации систем импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорными преобразователями (ТП) является одним из наиболее эффективных способов повышения их помехоустойчивости, статической и динамической точности [1, 2].

В большинстве случаев основу развертывающих систем составляет базовая структура интегрирующего развертывающего преобразователя (РП), включающая в себя сумматор  $\Sigma$ , интегратор (И) и релейный элемент (РЭ) с симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса (рис. 1, а), выходной сигнал которого меняется дискретно в пределах  $\pm A$ . Инвертор (Ин) предназначен для преобразования биполярных выходных импульсов РЭ в однополярные для последующей стыковки РП с элементами цифровой электроники.

РП представляет собой автоколебательную систему с частотно-широотно-импульсной модуляцией и знакопеременной обратной связью. При воздействии на вход гармонического сигнала

$X_C(t) = A_C \cdot \sin \omega t$  с кратностью  $(\bar{A}_C = |A_C / A|) \geq 2,0$  РП переходит в режим широтно-импульсной модуляции с частотой сигнала синхронизации  $X_C(t)$  [3]. При равенстве частоты собственных автоколебаний РП и частоты сигнала  $X_C(t)$  между входным и выходным сигналами РП устанавливается фазовый сдвиг  $-90$  эл. град.

При этом в диапазоне частот входных воздействий  $f_{BX} \leq 0,5 \cdot (f_C = 1/T_C)$  РП имеет свойства близкие к апериодическому фильтру первого порядка с постоянной времени  $T_{\Sigma} \approx \pi T_C \bar{A}_C / 16$ , автоматически перестраиваемой в функции параметров синхронизирующего воздействия (напряжения сети), что делает данный класс РП весьма эффективным при построении устройств синхронизации (УС) СИФУ ТП, в частности, интервало-кодowego типа (рис. 1, б).

В рассматриваемом устройстве синхронизации каналы УС-А, УС-В, УС-С выполнены на основе РП (см. рис. 1, а), который сдвигает свой

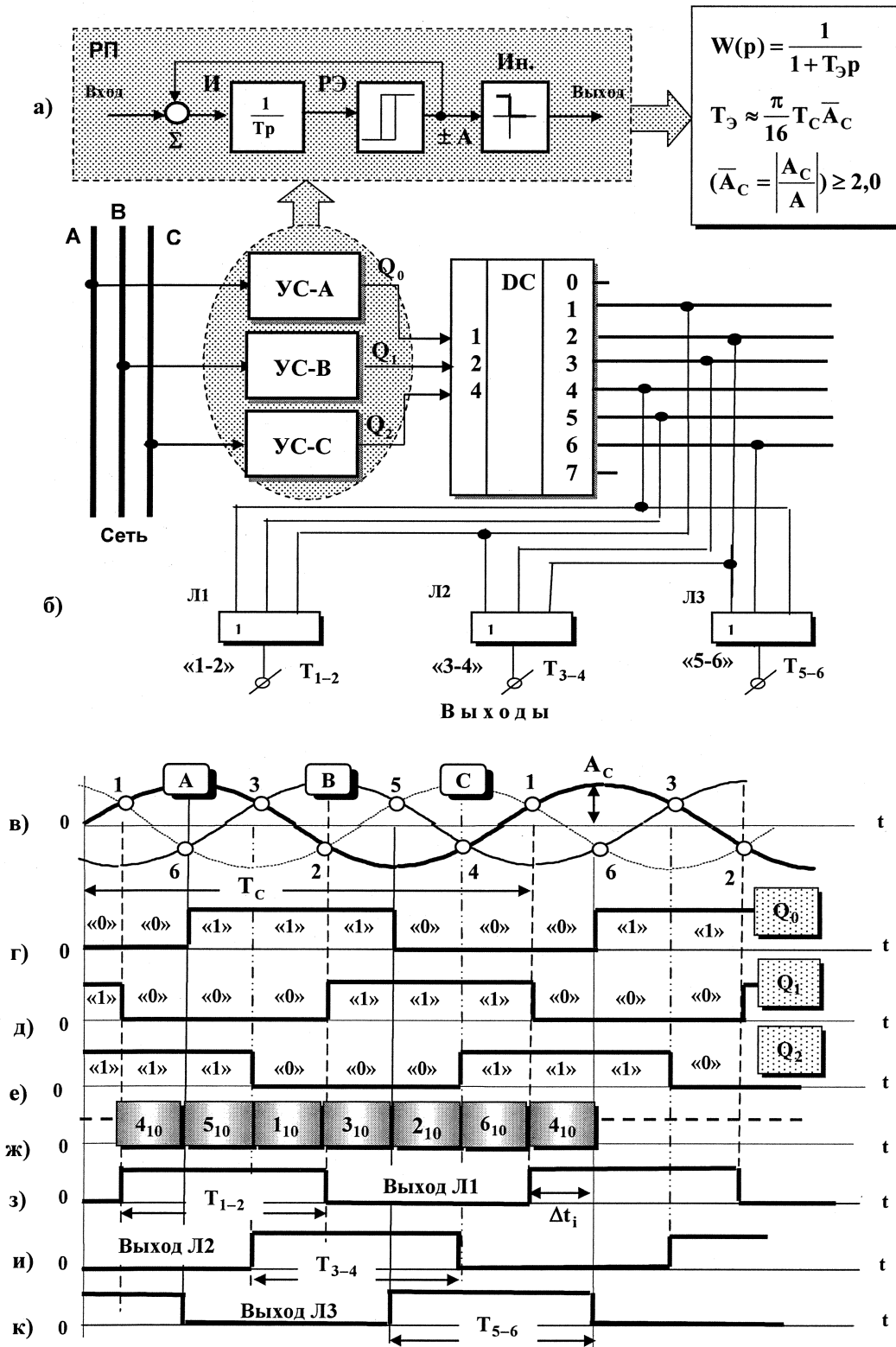


Рис. 1. Структурные схемы РП (а), интервало-кодового двоичного устройства синхронизации (б) и временные диаграммы его сигналов (б – к)

выходной логический сигнал («0» или «1») на – 90 эл. град относительно соответствующей фазы А, В, С напряжения сети (рис. 1, в–е).

Здесь выходному сигналу УС-А присваивается значение  $Q_0$  младшего разряда, а выходу УС-С – значение  $Q_2$  старшего разряда двоичного кода.

В результате на каждом из интервалов в 60 эл. град формируется своя трехразрядная двоичная последовательность, десятичное значение которой показано на рис. 1, ж. Так, интервалу коммутации  $T_{1-2}$  (см. рис. 1, в, «1–2») соответствуют числа «4–5–1», интервалу  $T_{3-4}$  («3–4») – числа «1–3–2», а

## Преобразовательная техника

интервалу  $T_{5-6}$  («5–6») последовательность чисел «2–6–4». Затем с помощью трехразрядного двоичного дешифратора и логических элементов Л1 – Л3 функции «ЗИЛИ» для каждого из перечисленных интервалов коммутации формируется сигнал синхронизации (рис. 1, з–к).

Таким образом, несмотря на начальный фазовый сдвиг – 90 эл. град, который формирует РП в режиме внешней синхронизации, интерваловый алгоритм обеспечивает получение сигнала с требуемой длительностью, соответствующей заданному интервалу синхронизации ТП.

Аналогичный алгоритм обработки сигналов с выходов УС-А, УС-В, УС-С (рис. 2, а) может быть

получен с помощью программируемых логических матриц (ПЛМ), входящих в состав микроконтроллеров.

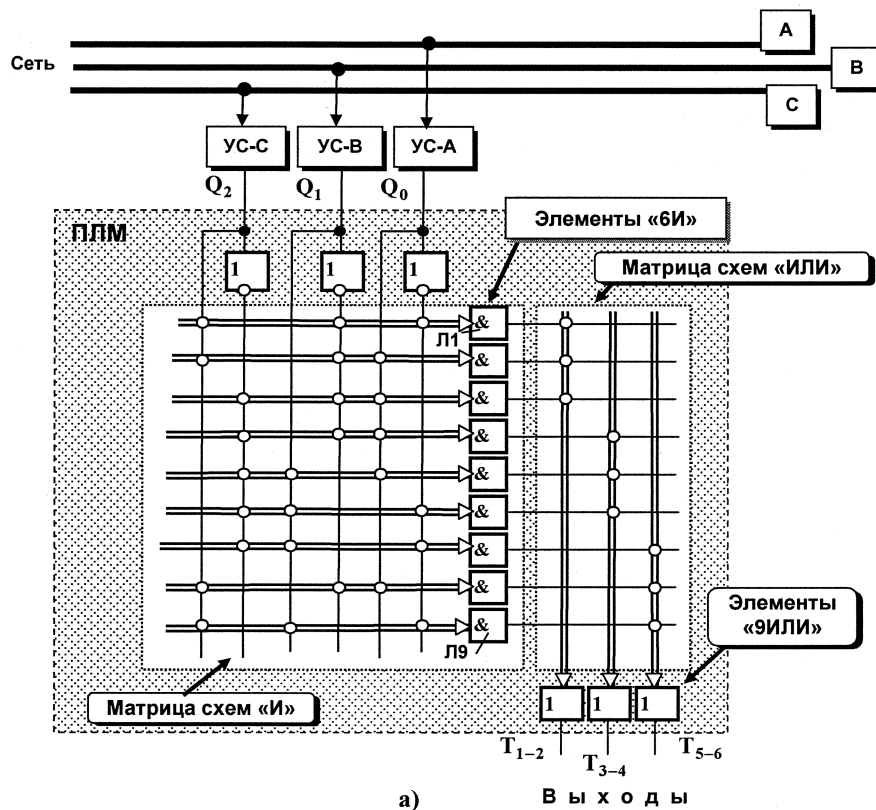
В этом случае на каждом из интервалов синхронизации  $T_{1-2}$ ,  $T_{3-4}$ ,  $T_{5-6}$  для участков  $\Delta t_i = 60$  эл. град (см. рис. 1, в–к) составляется система уравнений

$$\Delta t_1 = Q_0 \cdot Q_1 \cdot Q_3 \cdot \bar{Q}_0 \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_3$$

$$\Delta t_2 = Q_0 \cdot Q_1 \cdot Q_3 \cdot \bar{Q}_0 \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_3$$

$$\Delta t_3 = Q_0 \cdot Q_1 \cdot Q_3 \cdot \bar{Q}_0 \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_3$$

$$T_{1-2} = T_{3-4} = T_{5-6} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3,$$



Логический элемент	Произведение						Сумма		
	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_0$	$T_{1-2}$	$T_{3-4}$	$T_{5-6}$
Интервал синхронизации $T_{1-2}$									
Л1	1	0	0	0	1	1	1	-	-
Л2	1	0	1	0	1	0	1	-	-
Л3	0	0	1	1	1	0	1	-	-
Интервал синхронизации $T_{3-4}$									
Л4	0	0	1	1	1	0	-	1	-
Л5	0	1	1	1	0	0	-	1	-
Л6	0	1	0	1	0	1	-	1	-
Интервал синхронизации $T_{5-6}$									
Л7	0	1	0	1	0	1	-	-	1
Л8	1	0	1	0	1	0	-	-	1
Л9	1	1	0	0	0	1	-	-	1

б)

Рис. 2. Интегрирующее устройство синхронизации на основе программируемой логической матрицы (а) и ее кодовая таблица (б)

на основании которой заполняется кодовая таблица ПЛМ (рис. 2, б).

Входы логических элементов Л1–Л9 матрицы схем «И» (см. рис. 2, а) подключаются к тем «вертикальным» шинам, которым в кодовой таблице соответствует символ «1».

С помощью матрицы схем «ИЛИ» (см. рис. 2, а) формируется результирующий выходной сигнал для соответствующего интервала синхронизации  $T_{1-2}$ ,  $T_{3-4}$ ,  $T_{5-6}$ .

Рассмотренные УС полностью адаптируются к колебаниям напряжения сети благодаря наличию в РП цепи обратной связи и интегратора в прямом канале регулирования, а также имеют высокую помехоустойчивость, что делает их применение

особенно эффективным в ТП, работающих с сетью ограниченной мощности.

#### Литература

1. Цытович, Л.И. Развертывающие преобразователи для систем управления вентиляльными электроприводами и технологической автоматикой: дис. ... д-ра техн. наук / Л.И. Цытович. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – 464 с.

2. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 34. – С. 35–41.

3. Цыпкин, Я.З. Релейные автоматические системы / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1974. – 576 с.

Поступила в редакцию 16.12.2009 г.

**Цытович Леонид Игнатьевич** – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматики промышленных установок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – информационно-измерительные устройства и комплексы систем управления технологическими процессами. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-85.

**Tsytovich Leonid Ignatievich** is Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: informational measuring units, complexes of process control systems. Tel: 8-(351) 267-93-85.

**Качалов Андрей Валентинович** – аспирант кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – системы управления электроприводов и технологических установок.

Контактный телефон: 8-(351) 267-94-32.

**Kachalov Andrey Valentinovich** is a post-graduate student of the Electric Drive Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: control systems of electric drives and processing plants. Tel: 8-(351) 267-94-32.

# СИНХРОНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.В. Качалов  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## SYNCHRONIZATION OF SYSTEMS OF THE PULSE-PHASE CONTROL OF VALVE INVERTERS ON THE BASE OF INTEGRATING SWEEP CONVERTER

A.V. Kachalov  
Chelyabinsk, SUSU

Приведено описание принципов построения интегрирующих устройств синхронизации вентильных преобразователей на основе интегрирующего развертывающего преобразователя. Показаны статические и динамические характеристики интегрирующих устройств синхронизации.

**Ключевые слова:** тиристорный преобразователь, развертывающий преобразователь, устройство синхронизации, модуляционная характеристика, амплитудная характеристика, частотно-широотно-импульсная модуляция

Description of the principles of building of the integrating synchronization devices of the valve inverters on the base of the integrating sweep converter is given. Static and dynamic characteristics of the integrating synchronization devices are given.

**Keywords:** thyristor converter, sweep converter, synchronization device, modulation characteristic, amplitude characteristic, frequency-width-pulse modulation.

Одним из наиболее эффективных способов повышения статической и динамической точности систем импульсно-фазового управления (СИФУ) вентильными преобразователями (ВП), а также их помехоустойчивости являются методы интегрирующего развертывающего преобразования [1]. В большинстве случаев основу развертывающих систем составляет базовая структура интегрирующего развертывающего преобразователя (РП), включающая в себя сумматор  $\Sigma$ , интегратор И и релейный элемент РЭ с симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса (рис. 1). Здесь приняты следующие обозначения:  $X_0(t)$ ,  $X_{BX}(t)$  – постоянная и гармоническая составляющие сигнала на входе РП соответственно;  $Y_{И}(t)$ ,  $Y(t)$  – сигналы на выходе интегратора и РЭ;  $\pm A$ ,  $\pm b$  – амплитуда выходных импульсов и величина порогов переключения РЭ;  $A_{BX}$ ,  $T_{BX}$  – амплитуда и период гармонического сигнала  $X_{BX}(t)$ ;  $T_0 = f_0^{-1} = 4 \cdot b \cdot T_{И} / A$  – период собственных колебаний РП;  $T_{И}$  – постоянная времени интегратора.

РП представляет собой автоколебательную систему с частотно-широотно-импульсной модуля-

цией (ЧШИМ) и знакопеременной обратной связью, поведение которой при гармоническом входном воздействии (рис. 2) описывается системой трансцендентных уравнений (1), где  $\pm \bar{b} = \pm |b/A|$  – нормированное значение порогов переключения РЭ;  $\bar{X}_0 = |X_0/A|$ ,  $\bar{A}_{BX} = |A_{BX}/A|$  – нормированное значение постоянной и переменной составляющих сигнала управления;  $\bar{f}_{BX} = f_{BX}/f_0$  – нормированное значение частоты переменной составляющей входного воздействия. Решение системы уравнений (1) в среде MathCAD позволяет получить пространства динамического состояния, показанные на рис. 2:

$$t_n = \frac{2 \cdot \bar{b} \cdot T_{И}}{1 - (-1)^n \cdot \bar{X}_0} + \frac{(-1)^n \cdot \bar{A}_{BX}}{\pi \cdot \bar{f}_{BX} \cdot f_0 \cdot (1 - (-1)^n \cdot \bar{X}_0)} \times \\ \times \sin \left[ \pi \cdot \bar{f}_{BX} \cdot f_0 \cdot \left( 2 \cdot \sum_{n=1}^{n-1} t_n + t_n \right) \right] \cdot \sin \left[ \pi \cdot \bar{f}_{BX} \cdot f_0 \cdot t_n \right]; \\ \bar{T}_{0,n} = \left[ t_{2n-1} + t_{2n} \right] / T_0; \\ \bar{Y}_n = 1 - 2 \cdot t_{2n-1} / T_{0,n}; \\ \Delta \bar{Y}_n = \bar{Y}_n - \bar{Y}_{n|_{\bar{A}_{BX}=0}}, \quad (1)$$



где  $\bar{T}_{0,n}$  – период автоколебаний на n-м интервале дискретизации;  $\bar{Y}_n$  – среднее значение сигнала на выходе РП;  $\Delta\bar{Y}_n$  – значение ошибки сигнала  $\bar{Y}_n$  при воздействии гармонического сигнала  $X_{BX}(t)$ ;  $\bar{Y}_{n|_{A_{BX}=0}}$  – среднее значение сигнала на выходе РП при отсутствии гармонического сигнала на входе.

Анализ пространства динамического состояния РП  $\Delta\bar{Y}_1 = f(\bar{X}_0, \bar{f}_{BX})$  при работе с гармоническим входным воздействием  $X_{BX} = A_{BX} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{BX} \cdot t)$  в режиме ЧШИМ (рис. 2, а, б) показывает ряд специфических и полезных для практики свойств подобных систем.

Так, первый максимум характеристик  $\Delta\bar{Y}_1 = f(\bar{X}_0, \bar{f}_{BX})$  и  $\bar{T}_{0,1} = f(\bar{X}_0, \bar{f}_{BX})$  соответствует границе раздела области достоверной передачи частот (ОДП) и области замедленной дискретизации (ОЗД) входного воздействия. В ОДП развертывающийся преобразователь имеет характеристики, близкие к линейной системе.

Смещение первого максимума пространства  $\Delta\bar{Y}_1 = f(\bar{X}_0, \bar{f}_{BX})$  под действием постоянной со-

ставляющей  $X_0$  (см. рис. 2, а) свидетельствует о переменном значении полосы пропускания РП, которая уменьшается с ростом амплитуды сигнала управления, обеспечивая рост уровня помехоустойчивости РП в области «больших» сигналов. В ОЗД РП, как и любая другая импульсная система, ведет себя как преобразователь спектра, преобразуя высокочастотный сигнал в низкочастотный. С ростом частоты гармонического сигнала ошибка сигнала на выходе РП уменьшается, что качественно отличает данный класс интегрирующих систем от традиционных, где, как известно [2], увеличение частоты входного сигнала приводит к росту величины ошибки регулирования. Кроме того, РП имеет крайне низкий уровень ошибок замедленной дискретизации на частотах, превышающих частоту несущих автоколебаний [3], например, по сравнению с развертывающимися преобразователями с выборкой мгновенных значений сигнала управления [4].

Одним из наиболее примечательных качеств РП является его способность синхронизироваться внешним сигналом, переходя из режима ЧШИМ в режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Возможны различные варианты режимов синхро-

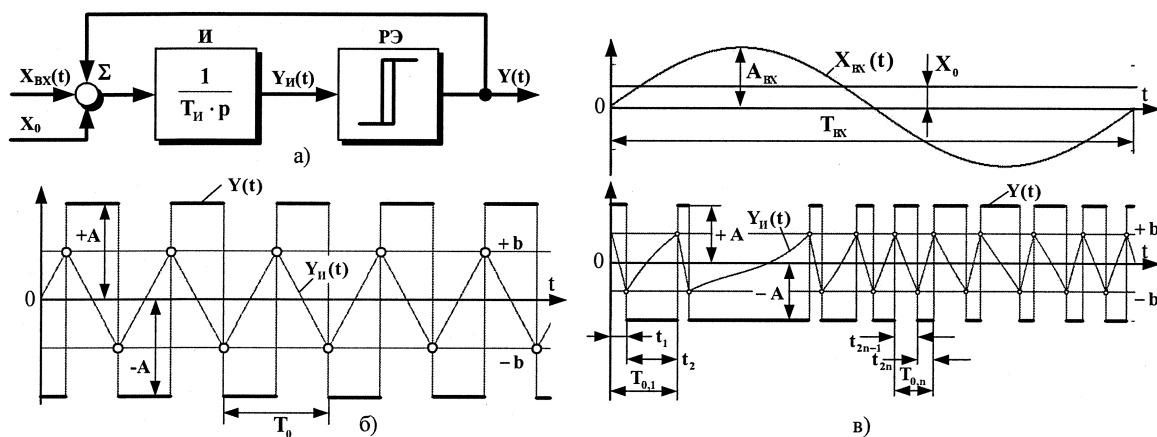


Рис. 1. Структурная схема интегрирующего РП и временные диаграммы его работы

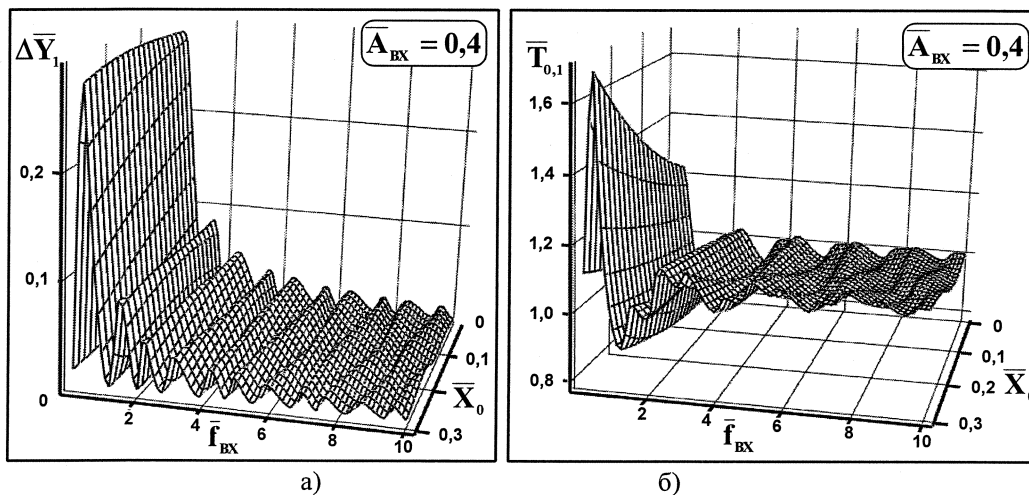


Рис. 2. Пространства динамического состояния  $\Delta\bar{Y}_1, \bar{T}_{0,1} = f(\bar{X}_0, \bar{f}_{BX})$

низации (рис. 3), включающие как воздействие сигнала синхронизации на информационный вход РП, так и на вход РЭ [5, 6]. Форма синхронизирующего воздействия также носит многообразный характер – от синусоидального до пилообразного сигналов. Для обеспечения высокой помехоустойчивости СИФУ наиболее приемлемым является синхронизация РП по информационному входу гармоническим сигналом, либо прямоугольными биполярными импульсами.

Как показали исследования, достаточным условием перехода РП в режим внешней синхронизации для прямоугольных биполярных импульсов является

$$(\bar{T}_C^{\Pi} \bar{A}_C^{\Pi}) \geq 1, \quad (2)$$

т. е. синхронизация РП наступает при условии превышения модулем вольт-секундной площади синхронизирующего воздействия значения модуля вольт-секундной площади выходных импульсов РП за период его собственных автоколебаний. Здесь:  $\bar{T}_C^{\Pi} = T_C^{\Pi} / T_0$  – нормированная величина периода входного сигнала синхронизации.

По аналогии с (2), для гармонического сигнала синхронизации  $X_C^G = A_C^G \cdot \sin \omega t$  имеем

$$\left[ \frac{2 \cdot \bar{T}_C^G \cdot \bar{A}_C^G}{\pi} \right] \geq 1, \quad (3)$$

где  $\bar{A}_C^G, \bar{T}_C^G$  – нормированное значение амплитуды и периода сигнала  $X_C^G$ .

Однако условие (3) для гармонического сиг-

нала синхронизации является необходимым, но не достаточным, так как при переходе сигналом  $X_C^G$  через нулевой уровень в РП может возникать режим собственных автоколебаний (режим частичной синхронизации), что недопустимо для СИФУ. Поэтому необходимо выполнение дополнительного условия

$$dY_{\text{и}}(t)/dt < dX_C^G(t)/dt. \quad (4)$$

В режиме внешней синхронизации РП приобретает свойства, которые для прямоугольных импульсов и гармонического сигнала описываются характеристиками аperiodического звена первого порядка  $W(p) \approx 1/(1+T_3 p)$  с постоянной времени  $T_3 \approx \pi \cdot T_C \cdot \bar{A}_C / 16$  [7]. Фактически РП представляет собой фильтр, параметры которого автоматически изменяются под действием характеристик синхронизирующего воздействия, что делает его перспективным для организации каналов синхронизации СИФУ при работе ВП в условиях «проблемной» сети.

Прежде всего, возникает вопрос о соотношении частоты синхронизирующего воздействия и собственной частоты автоколебаний РП, при котором обеспечивается необходимый угол синхронизации  $\alpha_C$  СИФУ.

В результате анализа, проведенного в среде Matlab+Simulink, получена зависимость  $\alpha_C = f(\bar{f}_C^G)$  для гармонического сигнала синхронизации (рис. 4), с помощью которой установлено, что угол  $\alpha_C = -90$  эл. град обеспечивается при



Рис. 3. Режимы внешней синхронизации интегрирующего РП

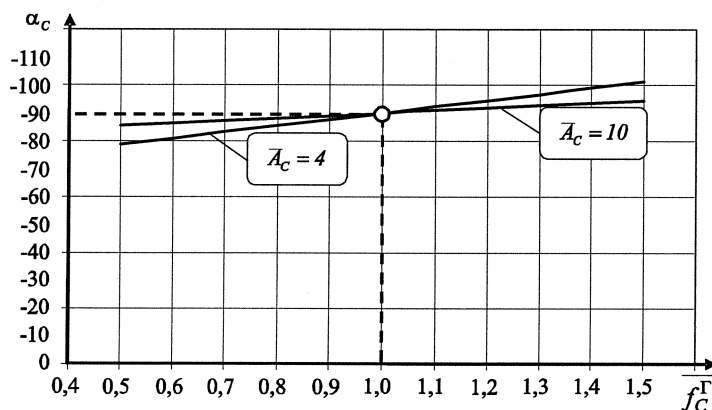


Рис. 4. Временная зависимость угла синхронизации от нормированной частоты сигнала синхронизации

равенстве частот сигнала синхронизации и собственной частоты автоколебаний РП. В дальнейшем  $\alpha_C = -90$  эл. град принимается в качестве базового, так как при этом значении  $\alpha_C$  наиболее просто реализуются каналы синхронизации ВП, что будет показано ниже.

На рис. 5 приведены пространства статического состояния  $\Delta\bar{\alpha}_C = f(\Delta\bar{A}_C^r, \bar{A}_C^r)$ ,  $\Delta\bar{\alpha}_C = f(\Delta\bar{f}_C^r, \bar{A}_C^r)$  зависимости нормированной ошибки угла синхронизации от нормированного отклонения амплитуды и частоты синхронизирующего сигнала при разных значениях глубины синхронизации  $\bar{A}_C^r$ .

Анализ приведенных характеристик показывает, что при изменении амплитуды синхронизирующего воздействия независимо от кратности сигнала синхронизации  $\bar{A}_C^r$  ошибка угла синхронизации отсутствует (рис. 5, а), что объясняется замкнутым характером структуры РП, когда интегратор стремится поддержать скважность выходных импульсов на заданном уровне. Это является

существенным преимуществом подобного рода УС по сравнению с их каскадным вариантом типа «фильтр – компаратор», широко применяемым в ВП отечественного и зарубежного производства [8].

При изменениях частоты сигнала синхронизации (рис. 5, б)  $\Delta\bar{\alpha}_C = f(\Delta\bar{f}_C^r, \bar{A}_C^r)$  приобретает существенно нелинейный характер.

Так, при отклонениях частоты синхронизации в пределах  $\pm 50\%$  и кратности синхронизирующего сигнала 4,0 ошибка угла синхронизации достигает более  $\pm 10\%$ . В то же время, если глубину синхронизации увеличить до 8,0, значение этой же ошибки  $\Delta\bar{\alpha}_C$  не превысит уровня  $\pm 5\%$ .

На рис. 6 приведены временные зависимости среднего значения сигнала на выходе РП  $\bar{Y} = f(t)$ . Проведенный анализ показывает, что длительность переходного процесса в РП, отсчитываемая от начала подачи на его вход сигнала синхронизации, пропорциональна глубине синхронизации  $\bar{A}_C^r$ . При этом среднее значение  $\bar{Y}$  сигнала на выходе РП в статике стремится к нулю, что объясняется замкнутой структурой РП и

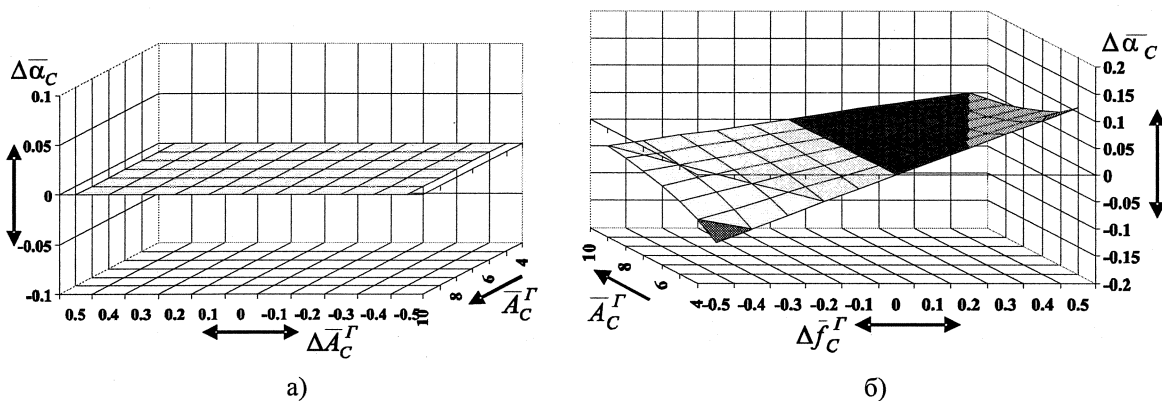


Рис. 5. Зависимость ошибки угла синхронизации при разных значениях кратностях синхронизации:

а)  $\Delta\bar{\alpha}_C = f(\Delta\bar{A}_C^r, \bar{A}_C^r)$ ;

б)  $\Delta\bar{\alpha}_C = f(\Delta\bar{f}_C^r, \bar{A}_C^r)$

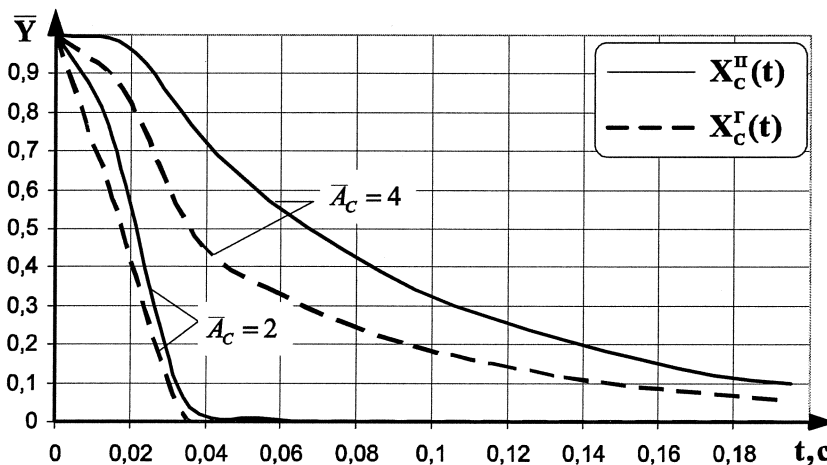


Рис. 6. Временная зависимость динамической ошибки сигнала на выходе РП

## Преобразовательная техника

наличием интегратора в прямом канале регулирования.

При одном и том же значении амплитуды синхронизирующего воздействия длительность переходного процесса выше для случая биполярных прямоугольных импульсов. Объясняется это тем, что при равенстве  $\bar{A}_C^I = \bar{A}_C^{II}$  вольт-секундная площадь прямоугольного синхронизирующего воздействия превышает вольт-секундную площадь синусоидального сигнала. В результате РП требуется больше времени на входение в установившийся режим внешней синхронизации. При этом наиболее рациональной глубиной синхронизации следует считать диапазон  $2,0 \leq \bar{A}_C^I$  (или  $\bar{A}_C^{II}$ )  $\leq 4,0$ , когда время переходного процесса в РП находится на уровне трех-пяти периодов сигнала синхронизации (напряжения сети).

В этом случае обеспечивается компромисс между быстродействием канала синхронизации ВП и устойчивой работой РП в режиме внешней синхронизации при колебаниях амплитуды напряжения сети. Здесь необходимо также отметить, что для прямоугольного синхронизирующего воздействия величина  $\bar{A}_C^{II}$  может быть предельно снижена, например, до величины  $\bar{A}_C^{II} = 1,2-1,5$ , так как амплитуда биполярных прямоугольных импульсов для каскада «компаратор – РП» не зависит от колебаний амплитуды напряжения сети.

На рис. 7 приведен один из возможных вариантов синхронизации СИФУ с применением РП для реверсивного мостового тиристорного преобразователя с разделенным управлением.

Каждый из каналов синхронизации УС-А, УС-В, УС-С (рис. 7, а) выполнен по идентичной

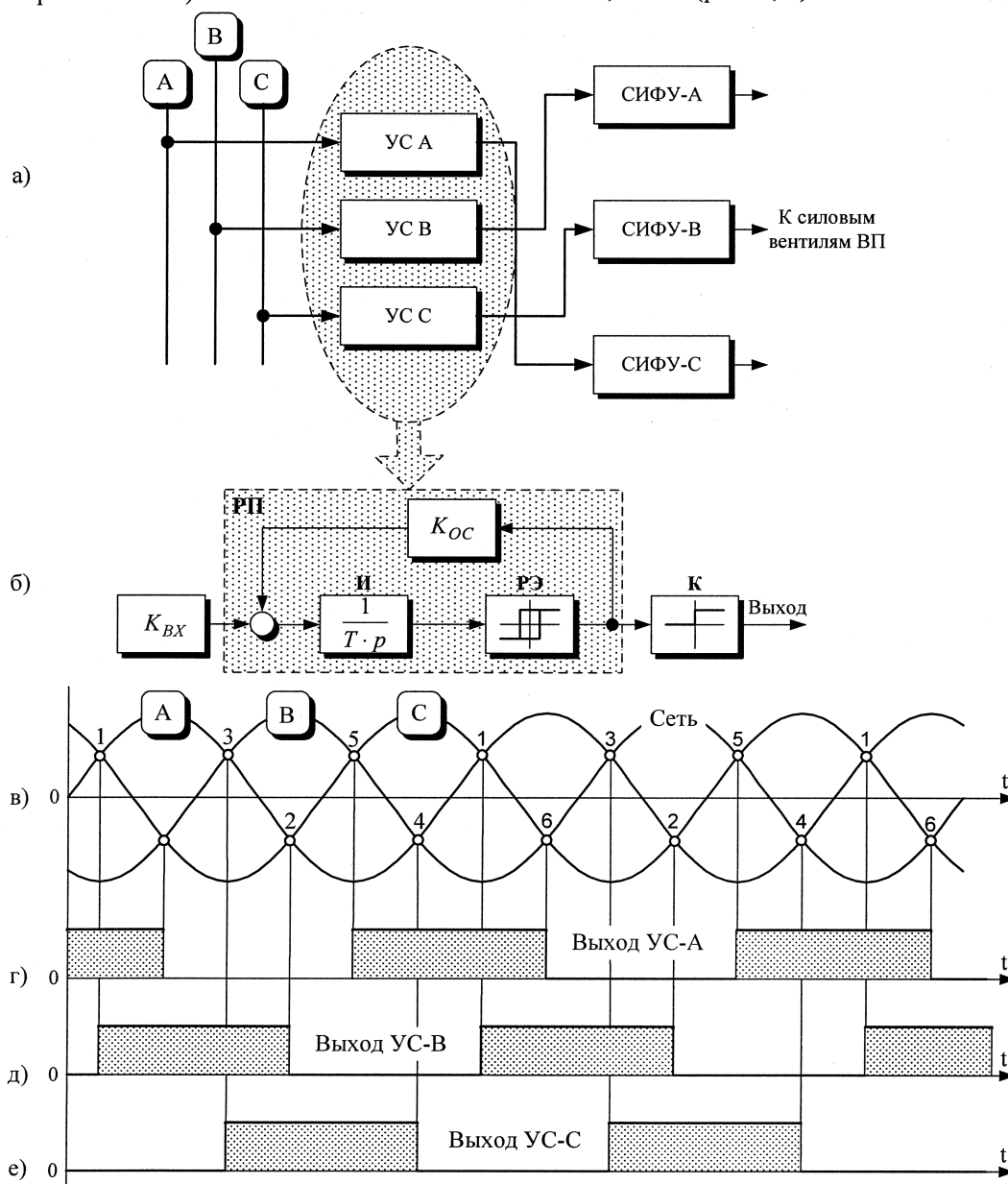


Рис. 7. Принцип перекрестной синхронизации систем управления ВП:  
а – функциональная схема; б – структурная схема; в–е – временные диаграммы

схеме РП (рис. 7, б), где, кроме ранее рассмотренных элементов, включены пропорциональные звенья  $K_{BX}, K_{OC}$ , определяющие коэффициент пропорционального усиления РП, и выходной компаратор К, с помощью которого биполярный выходной сигнал РП преобразуется в однополярные импульсы для последующего согласования с цифровыми элементами СИФУ-А, СИФУ-В и СИФУ-С. При этом соответствующий канал синхронизации должен обеспечить формирование сигнала логической «1» на интервалах коммутации «1–2» (фаза А), «3–4» (фаза В) и «5–6» (фаза С) (рис. 7, в).

Из диаграмм сигналов (рис. 7, в–е) видно, что сигнал логической «1» для соответствующего интервала коммутации может быть получен за счет метода «перекрестной» синхронизации, когда СИФУ – А синхронизируется УС – В, СИФУ – В получает сигнал синхронизации от УС – С, а СИФУ – С – от канала синхронизации УС – А (см. рис. 7, а, в–е).

Промышленные внедрения ВП с «перекрестной» синхронизацией показали высокую степень их надежности и помехоустойчивости, обусловленных построением каналов синхронизации на основе интегрирующих РП.

Синхронизация РП прямоугольными импуль-

сами предполагает включение на его входе промежуточного релейного элемента РЭ0 (рис. 8). При этом РП адаптируется только к частоте напряжения сети, так как амплитуда импульсов на выходе РЭ0 имеет фиксированное значение.

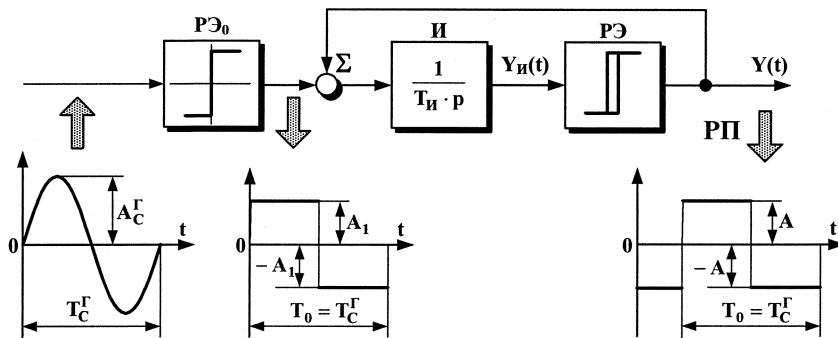
Отмеченный недостаток устранен в структурах (рис. 9, 10) за счет электропитания РЭ0 от источника нестабилизированного напряжения.

В первом случае (см. рис. 9) электропитание РЭ0 осуществляется комбинированным методом, когда стабилизатор напряжения СН формирует минимально требуемую для синхронизации РП амплитуду  $\pm A_1$  биполярных импульсов, а демодулятор ДМ гармоническую составляющую  $\pm \Delta A_C^r$  их «вершины», зависящую от напряжения сети.

Подобное решение предполагает работу устройства синхронизации с однофазной сетью.

При втором варианте (см. рис. 10) электропитание РЭ0 производится от трехфазного ДМ, например, трехфазной схемы выпрямителя с нулевым выводом.

Среднее значение амплитуды  $A_1^*$  синхронизирующего импульса также зависит от параметров напряжения сети. При этом любая из структур на рис. 9, 10 обладает свойством адаптации как к частоте, так и к амплитуде напряжения сети.



$$W(p) = \frac{1}{1 + T_{\Sigma}^* p}$$

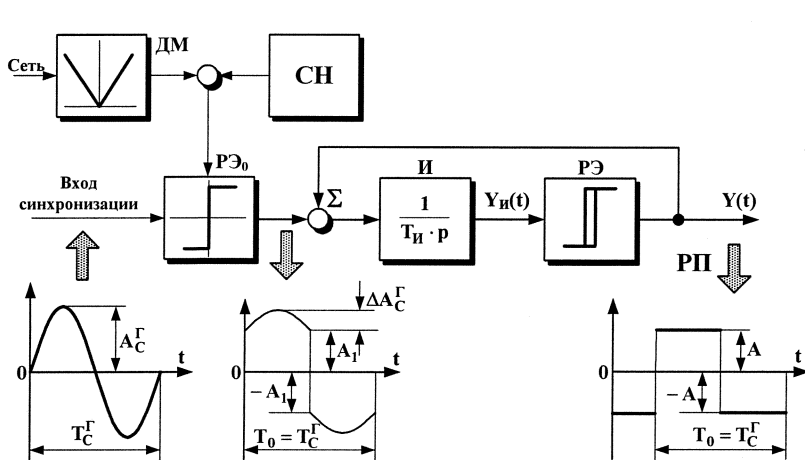
$$T_{\Sigma}^* \approx \frac{\pi}{16} T_C^r \bar{A}_1$$

$$\bar{A}_1 = \left| \frac{A_1}{A} \right|$$

$$\pm A = const$$

$$\pm A_1 = const$$

Рис. 8. Комбинированное интегрирующее УС «компаратор – РП» с частичной адаптацией



$$W(p) = \frac{1}{1 + T_{\Sigma}^{**} p}$$

$$T_{\Sigma}^{**} \approx \frac{\pi}{16} T_C^r (\bar{A}_1 + \Delta \bar{A}_C^r)$$

$$\bar{A}_1 = \left| \frac{A_1}{A} \right|$$

$$\Delta \bar{A}_C^r = \left| \frac{\Delta A_C^r}{A} \right|$$

$$\pm A = const$$

$$\pm A_1 = const$$

Рис. 9. Комбинированное адаптивное интегрирующее УС «компаратор – РП» с однофазным электропитанием компаратора

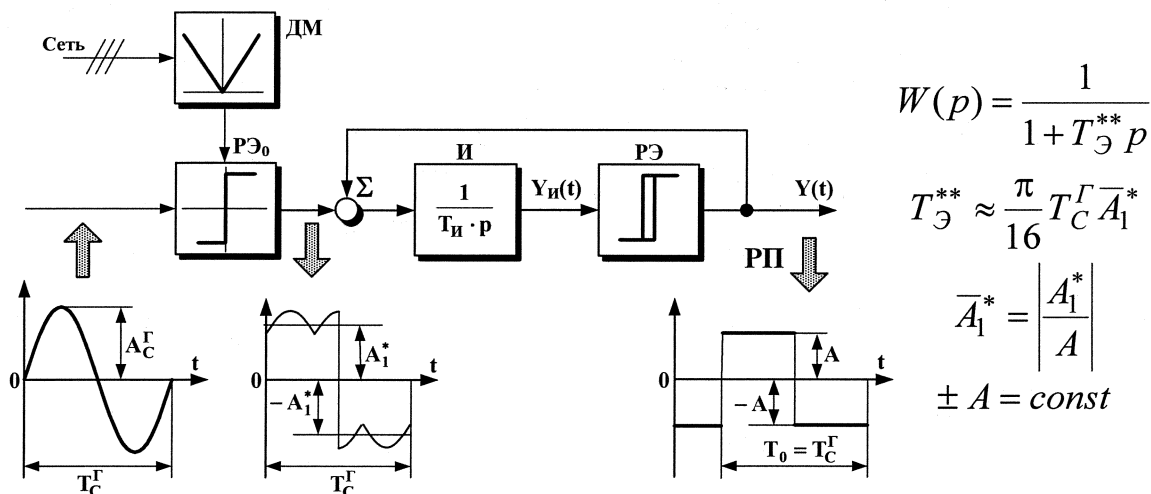


Рис. 10. Комбинированное адаптивное интегрирующее УС «компаратор – РП» с трехфазным электропитанием компаратора

### Заключение

1. Дан анализ динамических характеристик РП для режима автоколебаний, показавший высокую степень помехоустойчивости преобразователя в области замедленной дискретизации.

2. Получены условия внешней синхронизации РП гармоническим сигналом и биполярными прямоугольными импульсами.

3. Установлено, что для получения фазового сдвига в  $-90$  эл. град. между синхронизирующим и выходными сигналами РП необходимо равенство частоты сигнала синхронизации и частоты выходных импульсов РП.

4. Дан анализ погрешности угла синхронизации РП при изменениях амплитуды и частоты синхронизирующего воздействия. Определены условия настройки РП для работы в автономных и стационарных электрических сетях.

5. Впервые предложен метод «перекрестной» синхронизации каналов СИФУ трехфазного мостового ВП, обеспечивающий минимизацию элементов каналов синхронизации и высокую помехоустойчивость при работе с «проблемной» по своим характеристикам сетью.

6. Рассмотрены адаптивные комбинированные устройства синхронизации с питанием входного компаратора от нестабилизированного источника напряжения.

### Литература

1. Мартяшин, А.И. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и

измерения / А.И. Мартяшин, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин. – М.: Энергия, 1976. – 390 с.

2. Осипов, О.И. Экспериментальное исследование промышленных помех и разработка способов их подавления в вентилях электроприводах прокатных станов с элементами УБСР: дис. ... канд. техн. наук / О.И. Осипов. – Челябинск: ЧПИ, 1974. – 218 с.

3. Хьюлсман, Л.П. Активные фильтры / Л.П. Хьюлсман; пер. с англ. под ред. И.Н. Теплюка. – М.: Мир, 1972. – 516 с.

4. Электроприводы переменного тока: Труды международной тринадцатой научной конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 276 с.

5. Цыпкин, Я.З. Релейные автоматические системы / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1974. – 576 с.

6. Цытович, Л.И. Развертывающие преобразователи для систем управления вентилями электроприводами и технологической автоматике: дис. ... д-ра техн. наук / Л.И. Цытович. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – 464 с.

7. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматуллин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – №34. – С. 35–41.

8. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андриященко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

Поступила в редакцию 18.12.2009 г.

**Качалов Андрей Валентинович** – аспирант кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – системы управления электроприводов и технологических установок. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-32.

**Kachalov Andrey Valentinovich** is a post-graduate student of the South-Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: control systems of electrical drives and installations. Contact phone: 8-(351) 267-94-32.

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-83::621.313.3

## ПОТЕРИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ УПРАВЛЕНИЯ\*

Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, К.М. Виноградов,  
А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## POWER LOSSES IN THE VARIABLE-SPEED ELECTRIC DRIVES AT DIFFERENT CONTROL LAWS

Y.S. Usynin, M.A. Grigoriev, A.N. Shishkov, K.M. Vinogradov,  
A.N. Gorozhankin, A.E. Bychkov  
Chelyabinsk, SUSU

Для электродвигателей разного типа (асинхронных, синхронных, постоянного тока, реактивных) и разными законами управления приведены обобщённые зависимости изменения соотношения составляющих потерь при изменении момента нагрузки.

*Ключевые слова:* электрические потери, асинхронный электропривод, синхронный электропривод, электропривод постоянного тока, электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Power losses at load moment change for the different types of electric motors (induction, synchronous, direct current, reaction motors) and with different control laws are given.

*Keywords:* electric loss, induction motor, synchronous motor, direct current motor, reaction motors, electric drive with the of independent excitation synchronous reluctance machine.

**Введение.** Работа современного регулируемого электропривода, как правило, происходит при переменной нагрузке и с разными законами регулирования момента и скорости. Это приводит к перераспределению составляющих потерь и требует их учёта. Ниже сопоставлен характер изменения общих потерь и их составляющих в электроприводах разного типа при изменении нагрузки.

**Исходные данные для анализа.** В основу анализа положено наблюдение, которое заключается в том, что у двигателей, имеющих близкие значения КПД, характер изменения составляющих потерь также близок, хотя при этом абсолютные потери могут отличаться весьма значительно. Этот факт дал возможность при изменении нагрузки представить изменение составляющих потерь в относительных единицах, взяв за базовое значение суммарные потери в электродвигателе в номи-

нальном режиме. При этом внутри каждой серии электродвигателей абсолютные потери могут отличаться и весьма значительно.

**Результаты расчётов.** В двигателях постоянного тока, в которых номинальный КПД находится в пределах 0,8...0,95, на основании обзора нескольких десятков клиентских формуляров [1] можно предложить следующие усреднённые относительные значения составляющих потерь в номинальном режиме работы двигателя:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{-} + \Delta P = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{коп}} + \Delta P_{\text{доб}} + \\ &+ \Delta P_{\text{колл}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} = \\ &= 0,25 + 0,2 + 0,05 + 0,06 + 0,25 + 0,2 + 0,1 = 1,\end{aligned}$$

где  $\Delta P_{\text{як}}$  – потери в обмотке якоря;  $\Delta P_{\text{коп}}$  – потери в обмотках компенсационной и добавочных полюсов;  $\Delta P_{\text{доб}}$  – добавочные потери;  $\Delta P_{\text{колл}}$  –

\*Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по проблеме «Энергосберегающие электроприводы на основе новых типов электрических машин и вентильных преобразователей» (госконтракт № П1442 от 03.09.2009).

потери на коллекторе;  $\Delta P_{\text{стали}}$  – потери в стали;  $\Delta P_{\text{тр}}$  – потери на трение и вентиляцию;  $\Delta P_{\text{возб}}$  – потери на возбуждение.

В тех случаях, когда двигатель постоянного тока работает в регулируемом электроприводе при неизменном токе возбуждения, переменные потери можно описать так:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{колл}} = 0,45 \cdot M^2,$$

т. е. считать их пропорциональными квадрату от носительной величины момента нагрузки.

Постоянные потери

$$\Delta P = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{колл}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} \cong \cong 0,45 = \text{Const}.$$

Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки описывается кривой 1 на рис. 1.

В тех случаях, когда регулируемый электро-

привод работает в перемежающемся режиме S6, то с целью снижения потерь в электроприводе при нагрузках меньших номинальных снижают ток возбуждения двигателя, как правило, пропорционально току якоря. В этом случае наблюдается перераспределение потерь между составляющими:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{ко}} + \Delta P_{\text{возб}} + \Delta P_{\text{стали}} = 0,8 \cdot M.$$

Суммарные потери описываются кривой 1 на рис. 2.

В синхронных двигателях (СД) обзор клиентских формуляров [1] дал следующие приближённые соотношения для составляющих потерь в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} = = 0,23 + 0,25 + 0,1 + 0,2 + 0,22 = 1.$$

Здесь  $\Delta P_{\text{стали}}$  – потери в стали;  $\Delta P_{\text{тр}}$  – потери на трение и вентиляцию;  $\Delta P_{\text{як}}$  – потери в меди

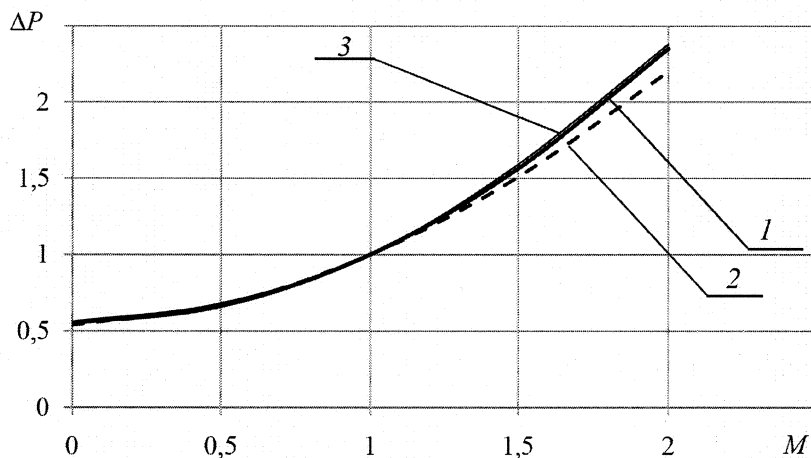


Рис. 1. Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки: 1 – в двигателе постоянного тока при постоянном возбуждении; 2 – в СД при постоянном магнитном потоке; 3 – в асинхронном двигателе при постоянном магнитном потоке

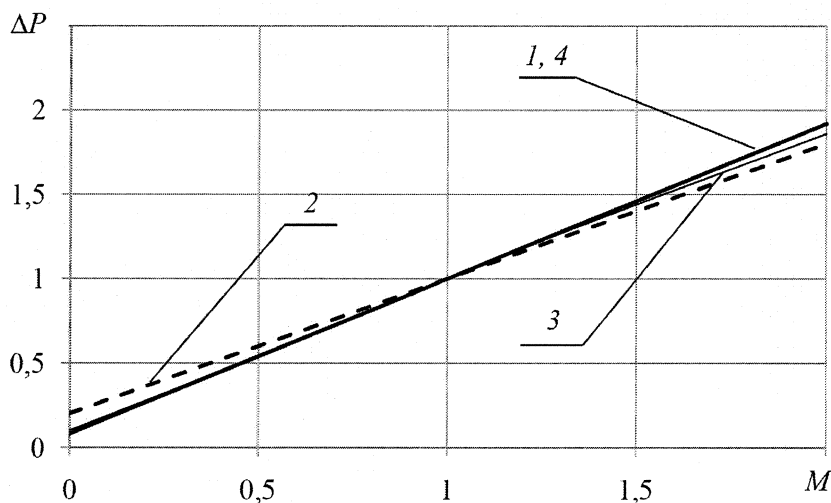


Рис. 2. Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки: 1 – в двигателе постоянного тока при последовательном возбуждении; 2 – в СД при регулируемом возбуждении; 3 – в асинхронном двигателе при постоянном скольжении; 4 – в СРМНВ при регулируемом токе возбуждения



статора;  $\Delta P_{\text{доб}}$  – добавочные потери;  $\Delta P_{\text{возб}}$  – потери на возбуждение.

Очень эффективным по своим регулировочным характеристикам считается способ формирования момента в СД, при котором поддерживается постоянство результирующего потока, равного номинальному значению, а также ортогональность пространственных векторов МДС статора и результирующего потокосцепления [2, 3]. В этом случае достигается пропорциональность между током статора и момента, а косинус угла сдвига между векторами фазных напряжений и тока статора СД равен единице.

В ранних схемах векторного регулирования [2] формирование момента осуществлялось воздействием на величины токов статора, ротора и пространственный угол между МДС, создаваемыми этими токами. В более поздних разработках, в частности, фирма АББ [4] предпочитает формировать момент воздействием на величины результирующего потока (точнее – его оценки) и тока статора при ортогональности между этими пространственными векторами.

При описанном законе формирования момента составляющие потерь в меди статора:

$$\Delta P_{\text{як}} = 0,25 \cdot M^2.$$

Потери на возбуждение ротора также следует отнести к переменным, так как ток возбуждения (в долях от номинального значения) регулируется, подчиняясь закону:

$$I_{\text{в}} = \sqrt{1 + I_{\text{с}}^2},$$

где  $I_{\text{с}}$  – относительное (в долях от номинального) значение тока статора.

Постоянные потери в этом случае:

$$\Delta P_{\text{пост}} \approx \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{стали}} \approx 0,43 = \text{const.}$$

Зависимость суммарных потерь в СД описывается кривой 2 на рис. 1.

Чтобы снизить потери в СД при нагрузках менее номинального значения, обычно снижают ток возбуждения пропорционально току статора [5].

В этом случае переменные потери:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{возб}} + \Delta P_{\text{стали}} \approx 0,8 \cdot M,$$

а к постоянным потерям следует отнести лишь механические потери:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{тр}} = 0,2 = \text{const.}$$

График суммарных потерь в этом случае соответствует кривой 2 на рис. 2.

Распределение составляющих потерь в асинхронных электроприводах принималось таким же, как предлагалось фирмой АББ для асинхронных двигателей повышенной энергоэффективности [6].

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} = \\ &= 0,34 + 0,18 + 0,24 + 0,14 + 0,1 = 1. \end{aligned}$$

В приведенном выражении  $\Delta P_{\text{я}}$  – потери в

меди статора;  $\Delta P_{\text{стали}}$  – потери в стали;  $\Delta P_{\text{рот}}$  – потери в роторе;  $\Delta P_{\text{доб}}$  – добавочные потери;  $\Delta P_{\text{тр}}$  – потери на трение и вентиляцию.

Когда регулирование момента производят при постоянном магнитном потоке двигателя, то к переменным потерям следует отнести потери в меди статора  $\Delta P_{\text{я}} = 0,34 \cdot I_1^2$  и  $\Delta P_{\text{рот}} = 0,24 \cdot I_2^2$  ротора, где  $I_1$  и  $I_2$  – токи статора и ротора в долях от их номинальных значений.

Постоянные потери могут быть приняты равными:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} \approx 0,43 = \text{Const.}$$

Суммарные потери при изменении момента нагрузки для асинхронного двигателя, имеющего в номинальном режиме соотношение токов статора  $I_1 = 1$ , ротора  $I_2 = 0,8$ , и намагничивания  $I_{\mu} = 0,6$ , описываются кривой 3 на рис. 1.

Когда регулирование асинхронного электропривода ведётся с минимумом потерь, то можно принять, что при изменении момента скольжение в двигателе оставляют неизменным, а токи статора, ротора и намагничивания изменяют в равных пропорциях [7]. В этом случае переменными потерями следует считать:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\sim} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{стали}} = \\ &= 0,34 \cdot I_1^2 + 0,24 \cdot I_2^2 + 0,18 I_{\mu}^2. \end{aligned}$$

Здесь  $I_1, I_2, I_{\mu}$  – токи статора, ротора и намагничивания в долях от их значений в номинальном режиме двигателя. Постоянные потери

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{мех}} \approx 0,24 = \text{const.}$$

График суммарных потерь характеризуется кривой 3 на рис. 2.

Высокими энергетическими и удельными показателями характеризуется электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [8], по западной терминологии – Field Regulated Reluctance Machine (FRRM) [9]. Поскольку авторы не располагали готовой информацией о составляющих потерь в этих электродвигателях, то был выполнен электромагнитный расчёт СРМНВ со следующими паспортными данными:  $P_{\text{н}} = 23,5$  кВт,  $n_{\text{н}} = 1500$  об/мин,  $U_{\text{н}} = 150$  В,  $I_{\text{фазы}} = 50$  А,  $\eta_{\text{н}} = 91\%$ . Этот расчёт дал следующие соотношения составляющих потерь

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{тр}} = \\ &= 0,67 + 0,25 + 0,03 + 0,05 = 1. \end{aligned}$$

В приведенном выражении  $\Delta P_{\text{я}}$  – потери в меди статора;  $\Delta P_{\text{стали}}$  – потери в стали;  $\Delta P_{\text{рот}}$  – потери в роторе;  $\Delta P_{\text{тр}}$  – потери на трение и вентиляцию.

Как правило, в СРМНВ токи якоря и возбуждения регулируют пропорционально друг другу [8], тогда составляющие  $\Delta P_{\text{я}}$  и  $\Delta P_{\text{стали}}$  следует

относить к переменным потерям, а  $\Delta P_{\text{рот}}$  и  $\Delta P_{\text{тр}}$  – к постоянным. В результате общая зависимость потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\sim} + \Delta P = 0,82 \cdot M + 0,18.$$

Кривая 4 на рис. 2 соответствует этому случаю.

**Обсуждение результатов.** Двигатели общепромышленного исполнения, имеющие номинальный КПД в пределах  $\eta_n = 0,8 \dots 0,95$ , независимо от типа (синхронные, асинхронные, постоянного тока, реактивные) при изменении момента нагрузки имеют практически совпадающий характер изменения относительных значений постоянных и переменных составляющих потерь.

При регулировании скорости и(или) момента в электроприводах с поддержанием постоянства магнитного потока двигателя обобщенная зависимость суммарных потерь в долях от их значения в номинальном режиме двигателя может быть описана уравнением

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,57 + 0,43 \cdot M^2,$$

а в электроприводах, где ток возбуждения изменяют пропорционально току якоря:

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,1 + 0,9 \cdot M.$$

Когда момент нагрузки близок к номинальному значению или не отличается от него в ту или иную сторону более чем на 50 %, то, как это следует из сопоставления кривых на рис. 1 и 2, суммарные потери при обоих способах регулирования магнитного потока отличаются незначительно. Заметная выгода при работе с регулируемым магнитным потоком наблюдается в зоне малых нагрузок, когда момент нагрузки  $M \leq 0,5 \cdot M_n$ . Работу в зоне больших моментов при  $M \geq 1,5 \cdot M_n$  также выгоднее выполнять при регулируемом магнитном потоке, но на практике это не всегда удаётся из-за возможного насыщения магнитной системы электродвигателя. Тогда приходится переходить на двухзонное регулирование скорости или момента [3, 7].

### Литература

1. Альбом технических данных индивидуальных электрических машин для приводов прокатных станов: вторая редакция / под ред. А.И. Шейнмана. – М.: ГПИ «Тяжспромэлектроиздат», 1968. – 363 с.
2. Stemmer, H. Antriebssystem und elektronische Regeleinrichtung der getriebelosen Rohrmühle / H. Stemmer // Brown Boveri Mitt. – 1970. – Bd 57. – №3. – S. 121–129.
3. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
4. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
5. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
6. Тиммер, Р. Эффективность электрического двигателя / Р. Тиммер, М. Хелинко, Р. Эскола // АББ Ревю. Энергоэффективность. – 2007. – № 2. – С. 81–84.
7. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
8. 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.
9. Law, J.D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine / J.D. Law, A. Chertok, T.A. Lipo // IEEE Trans. on Industry Applications. – 1994. – № 5. – P. 1185–1193.

Поступила в редакцию 8.01.2010 г.

**Усынин Юрий Семёнович** – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – общепромышленный электропривод, дифференциальные электроприводы, электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

**Usynin Yury Semyonovich** is Dr. Sc. (Engineering), Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: general industrial electric drive, differential drivers, electric drives with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

**Григорьев Максим Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 223-67-13.

**Grigoriev Maxim Anatolievich** is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 223-67-13.

**Шишков Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промстаноек Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин, электроприводы с параметрическим регулированием. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

**Shishkov Alexandr Nikolaevich** is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines, electric drives with parametric control. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

**Виноградов Константин Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промстаноек Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – генераторы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

**Vinogradov Konstantin Mikhailovich** is Cand. Sc (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: generators with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

**Горожанкин Алексей Николаевич** – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промстаноек Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

**Gorozhankin Alexey Nikolaevich** is a post-graduate student of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Phone: +7 (351) 267-93-21.

**Бычков Антон Евгеньевич** – студент кафедры электропривода и автоматизации промстаноек Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

**Bychkov Anton Eugenievich** is a student of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Phone: +7 (351) 267-93-21.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МНЛЗ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОРЫВА КОРОЧКИ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОГО СЛИТКА

*С.И. Лукьянов, С.С. Красильников, Е.С. Суспицын,  
Д.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев  
г. Магнитогорск, МГТУ*

## ELABORATION OF THE CONTINUOUS CASTER ELECTRIC DRIVES CONTROL SYSTEM FOR THE RUNOUT OF THE SINTERSKIN OF THE UNINTERRUPTEDLY-CASTED INGOT PREVENTION

*S.I. Lukianov, S.S. Krasilnikov, E.S. Suspitsyn,  
D.V. Shvidchenko, R.S. Pishnograev  
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

Разработана методика выявления зависания корочки слитка в кристаллизаторе и предложена функциональная схема системы управления электроприводами МНЛЗ, позволяющая предотвращать прорывы непрерывно-литых слитков.

*Ключевые слова:* система управления электроприводом МНЛЗ, прорыв непрерывнолитых слитков.

A method of revelation of a sinterskin ingot hang-up in a crystallizer is elaborated. A functional diagram of an operating system of continuous caster which allows preventing runout of the uninterruptedly-casted ingots is offered.

*Keywords:* continuous caster electric drive control system, runout of the uninterruptedly-casted ingots.

Одним из основных факторов, определяющих производительность машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), является коэффициент её использования. Повышение значения коэффициента использования МНЛЗ прямо связано с сокращением времени простоя машины на выполнение ремонтных работ и ликвидацию последствий аварий. С целью сокращения времени простоя машины на современных МНЛЗ применяют системы технического диагностирования и контроля состояния отдельных агрегатов МНЛЗ, позволяющие сократить время выполнения ремонтных работ за счет оперативного обнаружения неисправностей оборудования и своевременной подготовки к выполнению ремонтов, и системы прогнозирования аварийных ситуаций, позволяющие на ранней стадии выявлять возникновение аварий и оперативно устранять причины их возникновения [1].

Прорыв корочки слитка является одним из самых распространенных и тяжелых видов аварии на МНЛЗ. До 80 % прорывов корочки слитка происходит из-за «приваривания» участка корочки слитка к стенке кристаллизатора (зависания корочки слитка). Прорыв корочки слитка приводит к разливу жидкого металла, температура которого составляет более 1500 °С, вынужденной остановке

машины и потере плавки. Экономические потери от одного прорыва металла с учетом затрат на восстановление оборудования и потерь производства могут достигать 1 млн рублей [2].

С целью предотвращения прорыва корочки слитка на большинстве отечественных и зарубежных МНЛЗ применяют системы раннего выявления зависания корочки слитка в кристаллизаторе. На большинстве МНЛЗ, установленных на территории Российской Федерации, используется система «Термовизор» производства НПП «Техноап» (г. Москва). Диагностическая информация от системы «Термовизор» поступает на пульт главного поста управления МНЛЗ в виде визуальных и звуковых предупреждающих сигналов, на основании которых оператор разливки, согласно технологической инструкции, в случае диагноза о зависании корочки слитка в кристаллизаторе сообщает об опасности прорыва на разливочную площадку и снижает скорость разливки до 0,4 м/мин. После этого персонал на разливочной площадке визуально проверяет достоверность диагноза о зависании корочки слитка и, в случае подтверждения диагноза, даёт команду на главный пост управления на остановку машины. Далее оператор поста управления в ручном режиме останавливает МНЛЗ. В

случае ложного диагноза оператор главного поста выполняет разгон МНЛЗ до рабочей скорости вытягивания слитка [3, 4].

В процессе эксплуатации системы «Термовизор» на МНЛЗ №1-5 ОАО «ММК» выявлены следующие её недостатки [3]:

1. Низкая достоверность диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе. Так, в период с 01.01.2009 г. по 31.12.2009 г., в кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) ОАО «ММК» зафиксировано 10 не выявленных системой случаев зависания корочки слитка в кристаллизаторе.

2. Высокое количество (до 70 %) ложных диагнозов о зависании корочки слитка в кристаллизаторе, что приводит к неоправданным снижениям скорости вытягивания слитка и, как следствие, к снижению производительности МНЛЗ, ухудшению качества слэбов из-за нарушения технологии непрерывной разливки и нарушению ритмичности работы смежных технологических агрегатов.

3. Отсутствие технической возможности автоматического управления электроприводами. Процесс ликвидации зависания корочки слитка в ручном режиме на основе визуальной и звуковой информации приводит к возникновению прорывов, связанных с субъективными факторами.

На ряде зарубежных МНЛЗ применяются системы автоматического управления механизмами машин с целью предотвращения прорыва корочки слитка в кристаллизаторе. Однако конкретная информация о принципах работы указанных систем, а также систем диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе, отсутствует и является «секретом производства» фирм-конструкторов и производителей МНЛЗ.

Поэтому задача разработки системы диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе, обладающей высокой достоверностью диагнозов, и на её основе системы автоматического управления электроприводами механизмов МНЛЗ, позволяющей существенно снизить вероятность прорыва корочки слитка, является актуальной.

В мировой практике для анализа и контроля теплообменных процессов при формировании корочки слитка в кристаллизаторе наиболее часто применяется метод, основанный на измерении при помощи термопар температуры медных стенок кристаллизатора. Термопары располагают в несколько рядов по периметру кристаллизатора таким образом, чтобы в рабочем режиме разливки стали все термопары находились ниже уровня металла.

На МНЛЗ №1-5 ОАО «ММК», производства ОАО «Уралмаш», в стенки кристаллизаторов установлены 3 ряда термопар по 36 датчиков в каждом ряду (рис. 1, а). Информация с термопар поступает в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) МНЛЗ с дискретой съема сигналов от каждого датчика  $\Delta t = 0,85$  с [3].

На рис. 1, б приведены типичные временные диаграммы изменения сигналов температур  $T_j$ , поступающих в АСУ ТП МНЛЗ от термопар, при зависании корочки слитка в районе 40-й термопары (рис. 1, а). Согласно рис. 1, б зависание корочки слитка (момент времени  $t_1$ ) в районе 40-й термопары приводит к росту значений температуры  $T_{40}$ . После достижения температуры определённой экстремальной величины, наблюдается её снижение ниже значения, соответствующего нормальному режиму охлаждения металла в кристаллизаторе. Кроме этого, наблюдается аналогичное  $T_{40}$  со сдвигом во времени изменение значений температур на смежных датчиках № 41 и № 77.

В результате аналитического и статистического анализа временных диаграмм изменения значений температур  $T_j$  для нормальных режимов разливки стали и для случаев зависания корочки слитка в кристаллизаторе определены характерные признаки зависания корочки слитка в кристаллизаторе: рост температуры на участке рабочей стенки кристаллизатора в зоне зависания корочки слитка; последующее снижение темпера-

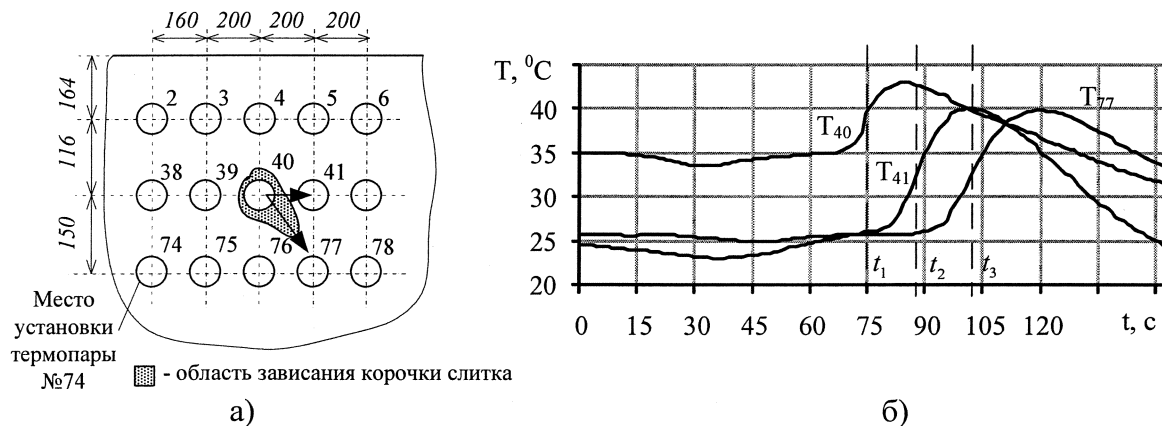


Рис. 1. Зависание корочки слитка в кристаллизаторе:  
а – фрагмент медной стенки кристаллизатора; б – временные диаграммы изменения температуры  $T_j$  на термопарах № 40, 41, 77

туры на данном участке ниже значения температуры, соответствующего нормальному режиму охлаждения металла в кристаллизаторе; аналогичное проявление изменения температуры на смежных датчиках с запаздыванием по времени.

При анализе временных диаграмм были статистически обоснованы и рассчитаны числовые характеристики и математические выражения для построения авторской методики диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе [5].

Предложена следующая методика выявления зависания корочки слитка в кристаллизаторе.

1. Формируется массив  $A[n, m]$  значений температур  $T_{i,j}$  для каждой термопары, где  $i = 0..n$ ,  $n = 121$  – длина диагностического массива;  $j = 0..m$ ,  $m$  – количество термопар, находящихся в рабочем периметре кристаллизатора при отливке слябов конкретного сечения.

2. По данным массива  $A[n, m]$  рассчитывается и формируется массив  $B[k, m]$  (объемом  $k = n - 1 = 120$ ) интенсивностей изменения температур  $(\Delta T / \Delta t)_{i,j}$  рабочей поверхности кристаллизатора:

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta t} \quad (1)$$

3. Выполняется проверка первого диагностического признака зависания корочки слитка: наличие роста интенсивности изменения температуры на каждом участке рабочей стенки кристаллизатора.

По данным массива  $B[k, m]$  рассчитываются значения математических ожиданий  $\overline{(\Delta T / \Delta t)_j}$ , дисперсий  $S^2_{(\Delta T / \Delta t)_j}$ , доверительные интервалы генеральной дисперсии  $\sigma^2_{(\Delta T / \Delta t)_j}$  на уровне значимости  $q = 1 - p = 0,05$  и определяются верхние границы максимальных интенсивностей изменения температуры  $(\Delta T / \Delta t)_{\max j}$  для каждой термопары [4].

Для всех значений интенсивностей массива  $B[k, m]$  проверяется условие:

$$(\Delta T / \Delta t)_{i,j} > (\Delta T / \Delta t)_{\max j} \quad (2)$$

4. Выполняется проверка второго диагностического признака зависания корочки слитка в кристаллизаторе. По данным  $A[n, m]$  рассчитываются коэффициенты наклона  $K_j$  аппроксимирующей зависимости  $T_j(t) = K_j \cdot t + B_j$ :

$$K_j = \frac{N \cdot \left( \sum_{i=1}^N t_i \cdot T_{i,j} \right) - \left( \sum_{i=1}^N T_{i,j} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)}{N \cdot \left( \sum_{i=1}^N t_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \quad (3)$$

Если  $K_j < 0$ , то можно сделать вывод о зависании корочки слитка в кристаллизаторе.

5. Выполняется проверка третьего признака зависания корочки слитка:

$$R_{\min} < \frac{\Theta_{\text{реал}j}}{\Theta_{\text{расч}j}} < R_{\max} \quad (4)$$

где  $\Theta_{\text{реал}j} = t_3 - t_1$  – реальное время задержки между моментами увеличения температур  $T_j$  на смежных термопарах, с;  $\Theta_{\text{расч}j} = (y_j - y_{j-1}) / Vp$  – расчетное время задержки между моментами увеличения температур  $T_j$  на смежных термопарах, с;  $y_j$  и  $y_{j+1}$  – вертикальные координаты термопар, расположенных друг под другом, м;  $Vp$  – скорость вытягивания слитка, м/мин;  $R = (0,75..2)$  – эмпирический коэффициент.

Если проверки по пп. 3–5 выполняются, то делается вывод о возникновении зависания корочки слитка в кристаллизаторе.

На основании предложенной методики была разработана и внедрена в АСУ ТП МНЛЗ №1, 5 ОАО «ММК» программа раннего выявления зависания корочки слитка в кристаллизаторе. За время эксплуатации с 24.04.2009 г. программа показала высокую достоверность диагнозов о зависании корочки слитка (100 %) при низком количестве (до 4 в месяц) ложных сигналов.

На основании проведенных исследований с учетом технологических особенностей разливки стали на МНЛЗ криволинейного типа определены технологические требования к электроприводам основных механизмов МНЛЗ с позиции предотвращения прорыва жидкого металла при зависании корочки слитка в кристаллизаторе:

1. Электроприводы тянущих роликов и механизма качания кристаллизатора должны иметь возможность синхронно, за минимально возможное время, осуществлять кратковременный останов механизмов при возникновении зависания корочки слитка в кристаллизаторе. Одновременно и синхронно с этим электропривод стопорного механизма промежуточного ковша должен обеспечить закрытие стопора и гарантированно обеспечить прекращение подачи металла в кристаллизатор.

2. В системе управления электроприводами механизма качания кристаллизатора, тянущих роликов и стопорного механизма промежуточного ковша должна быть предусмотрена возможность по истечении 20–30 секунд с момента останова электроприводов автономного асинхронного разгона указанных механизмов до скорости вытягивания слитка 0,2 м/мин.

Далее управление электроприводами МНЛЗ передаётся АСУ ТП машины.

С учетом указанных технологических требований разработана структурная схема системы

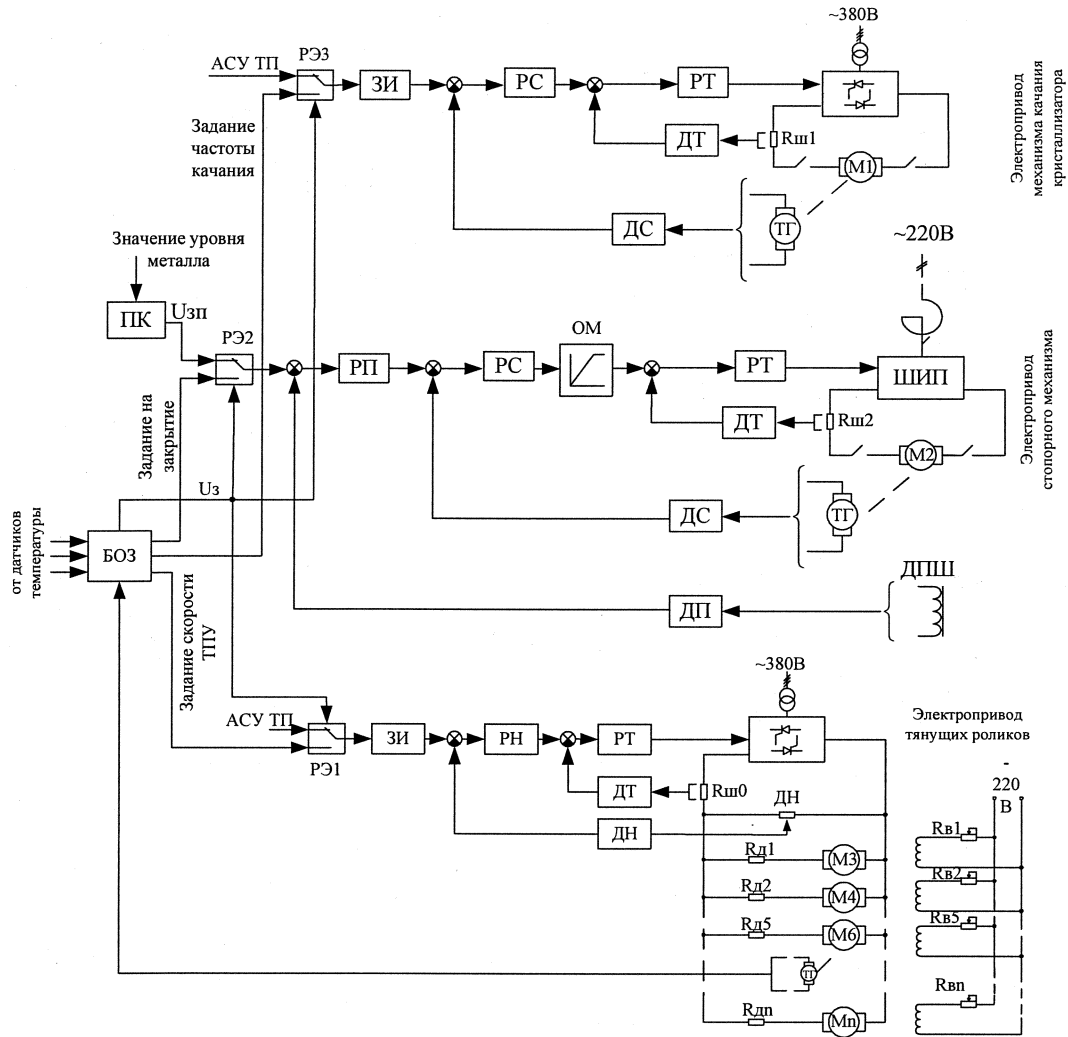


Рис. 2. Функциональная схема управления электроприводами МНЛЗ

управления электроприводами МНЛЗ (рис. 2) и алгоритм управления электроприводами при зависании корочки слитка в кристаллизаторе.

Предложено реализовать функции диагностирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе и управления электроприводами МНЛЗ с целью предотвращения прорыва корочки слитка в одном микропроцессорном устройстве – блоке определения зависаний (БОЗ). При выявлении зависания корочки слитка в кристаллизаторе по сигналу управления  $U_z$  с помощью релейных элементов РЭ1-РЭ3 (рис. 2) осуществляется отключение систем управления электроприводами МНЛЗ от АСУ ТП машины и их подключение к управляющим выходам блока БОЗ. После разгона электроприводов МНЛЗ до скорости вытягивания слитка 0,2 м/мин блок БОЗ передает управление электроприводами МНЛЗ системе АСУ ТП.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: БОЗ – блок определения зависания корочки слитка в кристаллизаторе; РЭ – релейный элемент; ПК – программируемый контроллер; ЗИ – задатчик интенсивности; РП – регулятор положения; РС – ре-

гулятор скорости; РТ – регулятор тока; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости; ДН – датчик напряжения; ДП – датчик положения; ОМ – ограничитель момента; ДПШ – датчик положения штока привода стопора.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенной системы управления, рассчитанный по данным за 2009 год, составил 2,8 млн руб. в год.

### Литература

1. Лукьянов, С.И. *Электропривод тянущего устройства МНЛЗ: монография / С.И. Лукьянов.* – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 100 с.
2. *Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. // ГУП-ПИК «Идеал-Пресс», 2003.* – 299 с.
3. *Анализ существующей системы предотвращения прорыва корочки слитка и ее взаимосвязь с электроприводом ТПУ МНЛЗ / С.И. Лукья-*

нов, Е.С. Суспицын, Д.В. Швидченко др. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 24.06.08, № 527-В2008.

4. Обобщенный алгоритм управления электроприводами МНЛЗ при зависании корочки слитка в кристаллизаторе / Е.С. Суспицын, Д.В. Швидченко, С.С. Красильников др. // Материалы докладов IV международной молодежной научной конференции «Тинчринские чтения». –

Казань: Казанский гос. техн. ун-т. – 2009. – Т. 3. – С. 167–169.

5. Определение требований к системе управления электроприводом ТПУ с позиций предотвращения прорыва корочки слитка / С.С. Красильников, С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын и др. // Оптимизация режимов работы электротехнических систем: межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2008. – С. 160–163.

*Поступила в редакцию 04.02.2010 г.*

**Лукьянов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор, проректор по инновационным технологиям и инвестициям ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова». Область научных интересов – общепромышленный электропривод.

**Lukyanov Sergey Ivanovich** is Dr.Sc. (Engineering), Professor, Vice-Rector for innovation technologies and investments of Magnitogorsk State Technical University. Research interests: general industrial electric drive.

**Красильников Сергей Сергеевич** – аспирант кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова». Область научных интересов – общепромышленный электропривод.

**Krasilnikov Sergey Sergeevich** is a post-graduate student of the Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University. Research interests: general industrial electric drive.

**Суспицын Евгений Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова». Область научных интересов – общепромышленный электропривод.

**Suspitsin Evgeny Sergeevich** is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University. Research interests: general industrial electric drive.

**Швидченко Дмитрий Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова». Область научных интересов – общепромышленный электропривод.

**Shvidchenko Dmitry Vladimirovich** is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University. Research interests: general industrial electric drive.

**Пишнограев Роман Сергеевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова». Область научных интересов – общепромышленный электропривод.

**Pishnograev Roman Sergeevich** is Cand. Sc. (Engineering), senior lecturer of Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University. Research interests: general industrial electric drive.



## МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ДЛЯ ЗАДАЧ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ \*

*В.В. Купцов, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров  
г. Магнитогорск, МГТУ*

## METHOD OF ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE FOR THE PROBLEMS OF THE FINITE ELEMENT MODELING OF THE INDUCTION MOTOR

*V.V. Kuptsov, M.Y. Petushkov, A.S. Sarvarov  
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

Предложена методика расчета электромагнитного момента асинхронного двигателя через тензор напряжения Максвелла для задач конечно-элементного моделирования. Результаты расчетов сравниваются с известным методом косвенного определения момента АД.

*Ключевые слова:* электромагнитный момент, тензор напряжения Максвелла, конечно-элементное моделирование, асинхронный двигатель.

The method of analysis of the electromagnetic torque of the induction motor using Maxwell stress tensor for the problems of the FE modeling is offered. The calculation data are compared with the well-known method of the indirect determination of the torque of the induction motor.

*Keywords:* electromagnetic torque, Maxwell stress tensor, finite element modeling, induction motor.

Дальнейшее развитие теории электрических машин сложно представить без разработки комплексных математических моделей, максимально использующих возможности современной вычислительной техники. На кафедре электроники и микроэлектроники Магнитогорского государственного технического университета ведутся работы в одном из таких направлений. Речь идет о разработке конечно-элементных математических моделей асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Метод конечных элементов [1–5] находит все большее применение при расчете электротехнических устройств благодаря высокому уровню приближения математической модели к объекту исследования на уровне физики протекающих в нем электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов. Фактически данный уровень приближения ограничивается только возможностями используемой компьютерной техники. Так, в частности, при моделировании асинхронных двигателей, метод конечных элементов позволяет точно учитывать геометрию машины в ее поперечном сечении, а также электрические

параметры двигателя, включая нелинейность кривой намагничивания, сопротивление стержней и соединительных колец ротора и другие особенности, как например, возможные дефекты в магнитной и витковой системе электрической машины.

Фундаментальную роль в преобразовании энергии электромагнитного поля двигателя в механическую энергию вращения ротора играет электромагнитный момент. В задачах численного анализа электрических машин для вычисления сил и моментов наибольшее распространение получили методы, основанные на интегрировании так называемого тензора напряжения Максвелла (Maxwell's stress tensor) [4–6].

Рассмотрим ротор двигателя и замкнутую поверхность  $S$ , окружающую ротор (рис. 1). Используя тензор напряжения Максвелла, можно получить выражение для элементарной силы, действующей со стороны магнитного поля:

$$d\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \left( \vec{B} \cdot \vec{n} \right) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \vec{n}, \quad (1)$$

где  $\vec{n}$  – вектор единичной нормали к поверхности  $S$ .

\* По материалам НИР, выполняемой в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2012 годы» по контракту ГК НК- 66(7) № П232.

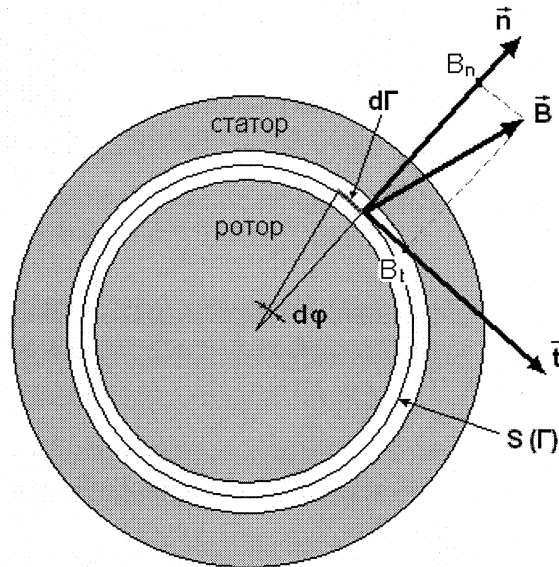


Рис. 1. Поперечное сечение двигателя и поверхность интегрирования S

Поскольку поле в поперечном сечении двигателя обычно принимается плоскопараллельным, то вектор магнитной индукции можно представить двумя ортогональными составляющими:

$$\vec{B} = B_n \vec{n} + B_t \vec{t}, \quad (2)$$

где  $B_n$  – составляющая, нормальная к поверхности S;  $B_t$  – составляющая, тангенциальная к поверхности S;  $\vec{t}$  – вектор единичной касательной к поверхности S.

Подставив (2) в (1), получим:

$$d\vec{F} = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \vec{n} - \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \vec{t}. \quad (3)$$

Момент, действующий на ротор со стороны магнитного поля, может быть выражен интегралом по поверхности S следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \oint_S (\vec{r} \times d\vec{F}) dS = \\ &= \oint_S \left( \vec{r} \times \left[ \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \vec{n} - \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \vec{t} \right] \right) dS, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки, лежащей на поверхности S.

Поскольку нормальная составляющая силы не участвует в создании вращающего момента, то выражение (4) можно упростить:

$$\vec{M} = \oint_S \left( \vec{r} \times \left[ -\frac{1}{\mu_0} B_n B_t \vec{t} \right] \right) dS. \quad (5)$$

Принимая допущение о плоскопараллельности поля внутри двигателя, интеграл по поверхности S можно заменить криволинейным интегралом по замкнутому контуру  $\Gamma$ , в который вырождается поверхность S:

$$\vec{M} = l \cdot \oint_{\Gamma} \left( \vec{r} \times \left[ -\frac{1}{\mu_0} B_n B_t \vec{t} \right] \right) d\Gamma, \quad (6)$$

где  $l$  – длина активного пространства двигателя.

Подставив в (6) следующие выражения:

$$\begin{aligned} \left| \vec{r} \times \vec{t} \right| &= \left| \vec{r} \right| \cdot \left| \vec{t} \right| \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{D_r + l_{\delta}}{2}; \\ d\Gamma &= \frac{D_r + l_{\delta}}{2} d\varphi, \end{aligned}$$

получим:

$$M = -\frac{l \cdot (D_r + l_{\delta})^2}{4\mu_0} \int_0^{2\pi} B_n B_t d\varphi, \quad (7)$$

где  $D_r$  – диаметр ротора;  $l_{\delta}$  – ширина воздушного зазора.

Возвращаясь к методу конечных элементов, рассмотрим приведенный на рис. 2 фрагмент сетки конечных элементов расчетной области поперечного сечения двигателя в области воздушного зазора. Сетка состоит из трех слоев, образованных треугольными конечными элементами.

Используя рис. 2, формулу (7) для вычисления электромагнитного момента можно приближенно записать в виде

$$M = -\frac{l \cdot (D_r + l_{\delta})^2}{4\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{B_{n,i-1} B_{t,i-1} + B_{n,i} B_{t,i}}{2} \Delta\varphi_i, \quad (8)$$

где  $B_{n,i}$  и  $B_{t,i}$  – соответственно нормальная и тангенциальная, относительно контура интегрирования  $\Gamma$ , составляющие вектора магнитной индукции в центре масс  $i$ -го конечного элемента среднего слоя сетки воздушного зазора двигателя;

$N$  – число конечных элементов в среднем слое сетки воздушного зазора.

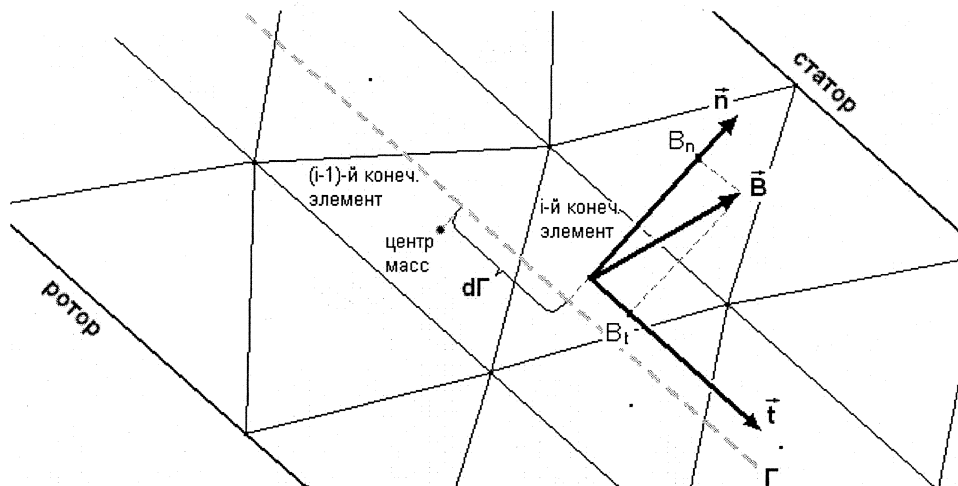


Рис. 2. Пояснение к расчету электромагнитного момента

В формуле (8) используется среднее между двумя соседними конечными элементами значение произведения  $B_n B_t$ .

В работе [7] изложена методика косвенного определения моментов на валу АД, согласно которой момент АД определится как:

$$\begin{cases} e_a = u_a - i_a \cdot R \\ e_b = u_b - i_b \cdot R \\ \psi_a = -\int e_a dt \\ \psi_b = -\int e_b dt \\ M_{э" = \sqrt{3} \cdot p \cdot (\psi_a \cdot i_b - \psi_b \cdot i_a), \end{cases} \quad (9)$$

где  $R$  – активное сопротивление обмотки статора;  $p$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;  $u_a, u_b, i_a, i_b, e_a, e_b, \psi_a, \psi_b$  – мгновенные значения фазных напряжений, токов, э.д.с. и потокосцепления соответственно;  $M_{э"}$  – электромагнитный момент асинхронного двигателя.

На рис. 3 представлена кривая электромагнитного момента, рассчитанного через тензор напряжения Максвелла по формуле (8), полученная при моделировании прямого пуска АД. По результатам моделирования была получена еще одна кривая электромагнитного момента АД, рассчитанного косвенным методом по формулам (9).

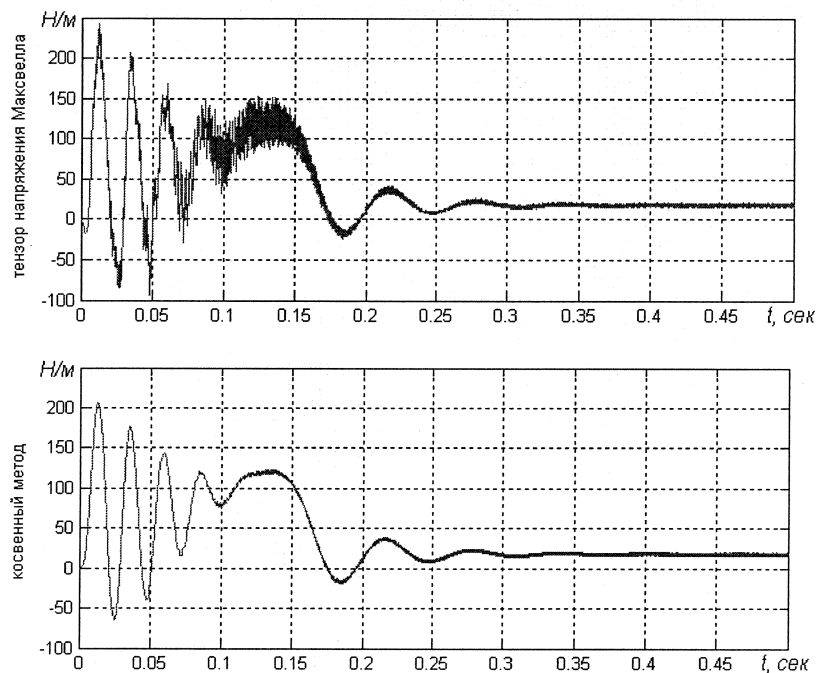


Рис. 3. Сравнение кривых электромагнитного момента пуска АД, рассчитанных двумя методами

### Литература

1. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд; пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
2. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
3. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 632 с.
4. Luomi, J. Finite element methods for electrical machines. Lecture notes for a postgraduate course in electrical machines / J. Luomi. – Chalmers University of Technology, Department of Electrical Machines and Power Electronics, Göteborg, 1993.
5. Chari, M.V.K. Finite elements in electrical and magnetic field problems. / M.V.K. Chari, P.P. Silvester. – J. Wiley & Sons, New York, 1980. – 219 p.
6. Finite element torque calculation in electrical machines while considering the movement / N. Sadowski, Y. Lefevre, M. Lajoie-Mazenc, J. Cros. – IEEE Trans. on Magnetics. – March, 1992. – Vol. 28. – P. 1410–1413.
7. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров. – М., 2000.

Поступила в редакцию 19.02.2010 г.

**Купцов Владимир Викторович** – аспирант кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Kuptsov Vladimir Viktorovich** is a post-graduate student of the Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University.

**Петушков Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Petushkov Mikhail Yurievich** is Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor of the Electronics and Microelectronics Department of Magnitogorsk State Technical University.

**Сарваров Анвар Сабулханович** – доктор технических наук, профессор, декан факультета автоматизации и вычислительной техники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Sarvarov Anvar Sabulkhanovich** is Dr.Sc. (Engineering), Professor, Dean of the Automation and Computer Science Faculty of Magnitogorsk State Technical University.

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИБРОЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.Г. Возмилов\*, Р.Б. Яруллин \*\*

\*г. Челябинск, ЧГАА, \*\*г. Уфа, УГАЭС

## TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE VIBRO GRAIN CLEANER WITH CONTROLLED PARAMETERS

A.G. Vozmilov\*, R.B. Yarullin\*\*

\*Chelyabinsk, Chelyabinsk State Agroengineering University

\*\*Ufa, Ufa State Academy of Economy and Service

Рассмотрены вопросы технико-экономических аспектов от использования регулирования кинематических параметров виброзерноочистительной машины.

*Ключевые слова:* виброзерноочистительная машина, клиноременной вариатор скорости, инерционный саморегулируемый вибратор, преобразователь частоты, энергозатраты.

Issues of the technical and economic aspects of using of controlling of the vibro grain cleaner kinematic parameters are considered.

*Keywords:* vibro grain cleaner, variable speed V belt, inertial self adjusting vibrator, frequency inverter, power inputs.

Для качественного разделения семян сельхозкультур от трудноотделимых примесей и семян сорняков предпочтительны резонансные виброзерноочистительные машины (ВЗМ) с вибраторами инерционного типа с асинхронным двигателем (АД). Однако резонансным ВЗМ приходится постоянно преодолевать резонанс при пуске и остановке машины, сопровождающихся повышенными энергозатратами. С целью обеспечения качественной сепарации различных смесей семян на ВЗМ требуется плавно регулировать частоту и амплитуду колебаний рабочего органа ВЗМ по гиперболическому закону[1]. На базовом варианте ВЗМ частоту колебаний регулируют плавно клиноременным вариатором скорости, амплитуду колебаний – ступенчато за счет изменения массы неподвижных дебалансов. Однако клиноременной вариатор скорости не обеспечивает необходимую стабильность частоты колебаний, часто требуется их корректировка, замена изношенных ремней, что снижает производительность и, главное, кондицию семян и тем самым цену реализуемой продукции. На проектном варианте ВЗМ плавное регулирование частоты колебаний предлагается осуществлять полупроводниковым преобразователем частоты, который одновременно позволяет реализовать плавный пуск и при остановке производить рекомендуемое динамическое торможение серийного АД. Плавное регулирование амплитуды колебаний по гиперболическому закону осуществляется само-

регулируемым инерционным вибратором за счет выдвижения второго подвижного противовеса, подпружиненного фасонной пружиной с нелинейной характеристикой жесткости.

Основная доля потребляемой мощности ВЗМ приходится на холостой режим работы машины без технологической нагрузки, которая при граничных скоростях регулирования вариатором скорости составляет для многорешетной ВЗМ [1] (65,3–100,7) % и в среднем для 4 типов ВЗМ соответственно (55,1–93,2) %. Причем, как показывают расчеты, преобладающая часть этой мощности идет на преодоление трения в подшипниках вибратора от центробежных сил дебалансов. В то же самое время выявлено, что немалая доля мощности при тех же скоростях (от 51 % до 31 %) теряется на вариаторе.

Установлено, что в переходных режимах пуска и торможения, в проектном варианте регулируемого асинхронного электропривода многорешетной ВЗМ (двигатель 2,2 кВт, преобразователь частоты 2,2 кВт, саморегулируемый вибратор) за счет плавного частотного пуска и динамического торможения со скорости  $\sqrt{3}$  от резонансной по сравнению с базовым вариантом (двигатель 4,5 кВт, клиноременной вариатор скорости, вибратор с неподвижными дебалансами) прямой пуск и торможение противовключением с начального скольжения  $S_{нач}=2$ , за сезон работы экономия энергии составит 3,4 кВт·ч на одну установку.

В установившемся режиме, принимая, что двигатели в базовом и проектном вариантах рабо-

Распределение мощности по элементам асинхронного электропривода многорешетной ВЗМ, Вт

Потери		Аппаратура управления $\Delta P_y$	Двигатель $\Delta P$	Механическая передача $\Delta P_{мп}$	Вибратор, вибромашина $\Delta P_{ВМ}$	Колебания РО $\Delta P_{кол}$	Полезная работа $\Delta P_{пол}$	Итого потери $\Delta P_y + \Delta P + \Delta P_{мп} + \Delta P_{ВМ}$
Вариант								
Вариант	Базовый	-	763	2092	1806	241	361	4661
	Проектный	50	307	40	682	241	361	1079
Изменение (+; -)		+ 50	-456	-2052	-1224	0	0	- 3582

тают в номинальном режиме, потребляемая мощность на колебательное движение рабочего органа  $P_{кол}$  составляет 10 % от мощности вибромашины в холостом режиме  $P_{ВМ}$  и соответственно на полезную работу  $P_{пол}=15\%$  от  $P_{ВМ}$ . Данные мощности постоянны и соответственно равны  $P_{кол}=241$  Вт,  $P_{пол}=361$  Вт. Мощность потерь вибратора  $\Delta P_{ВМ}$  в базовом варианте составляет 70% от  $P_{ВМ}=1686$  Вт, которая в проектном варианте за счет замены конических подшипников ( $\mu=0,008$ ) на сферические ( $\mu=0,0015$ ) только при 3-кратном уменьшении трения в подшипниках от центробежных сил дебалансов равны  $\Delta P_{ВМ}=1686:3=562$  Вт. Из таблицы следует, что суммарные потери в проектном варианте уменьшаются на 3582 Вт или в 4,3 раза.

Расчет экономической эффективности асинхронного электропривода многорешетной ВЗМ с регулируемыми параметрами проводился в соответствии с методикой экономической оценки средств электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства [3]. Экономический эффект от внедрения только за счет снижения энергетических затрат в установившихся режимах (мощность двигателя ниже не менее чем в 2,0–2,5 раза, потери мощности меньше в 4,3 раза), в переходных режимах (за сезон – 3,4 кВт·ч) и тем самым снижения энергоемкости процесса в 1,94 раза, повышения производительности труда в 1,09 раз и увеличения объема сепарируемых семян составил более 78 тыс. руб. на одну установку

(в масштабе 2 районов Республики Башкортостан – 1177 тыс. руб.) при сроке окупаемости 0,263 года.

### Выводы

1. Основными энергонасыщенными узлами электропривода вибромашины являются вибрация рабочих органов в холостом режиме (трение подшипников вибратора за счет центробежных сил дебалансов) и клиноременной вариатор скорости.
2. Использование частотно регулируемого асинхронного электропривода ВЗМ с саморегулируемым вибратором позволяет уменьшить мощность электродвигателя в 2–2,5 раза, потери мощности в 4,3 раза.

### Литература

1. Яруллин, Р.Б. Динамика вибрационных зерноочистительных машин (Проблемы электропривода) / Р.Б. Яруллин. – Уфа: Уфимск. гос. академия экономики и сервиса, 2007. – 189 с.
2. Кирпичникова, И.М. Характеристика распределения мощности виброчастотных машин с регулируемыми параметрами / И.М. Кирпичникова, Р.Б. Яруллин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – Красноярск, 2004. – № 6. – С. 169–174.
3. Водяников, В.Т. Экономическая оценка энергетики АПК: учебное пособие / В.Т. Водяников. – М.: ИКФ ЭКМОС, 2002. – 304 с.

Поступила в редакцию 14.03.2010 г.

**Возмилов Александр Григорьевич** – профессор кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» ЧГАА. Доктор технических наук, профессор. Научные интересы: электронно-ионная технология в АПК.

**Vozmilov Alexander Grigorievich** is Professor of the Application of Electric Energy in Agriculture Department of Chelyabinsk State Agroengineering University. Dr.Sc. (Engineering), Professor. Research interests: electron-ion technology in agro-industrial complex.

**Яруллин Ринат Бариевич** – профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса» Уфимской государственной академии экономики и сервиса, к.т.н., профессор. Научные интересы: электропривод в технологических процессах АПК.

**Yarullin Rinat Barievich** is Professor of the Machines, Mechanisms, Devices and Technologies of Service of Ufa State Academy of Economy and Service, Cand.Sc.(Engineering), Professor. Research interests: electric drive in technological processes of the agro-industrial complex.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

А.П. Сивкова  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## AUTOMATED COMPLEX FOR THE MAGNETIC HYSTERESIS LOOP RESEARCH

A.P. Sivkova  
Chelyabinsk, South Ural State University

Исследована возможность автоматизации получения статической петли гистерезиса на экране осциллографа.

*Ключевые слова:* статическая петля гистерезиса, динамическая петля гистерезиса, намагничивающая обмотка, вихревые токи, автоматизация.

The possibility of automation of obtaining of a static hysteresis loop on the oscillograph screen is researched.

*Keywords:* static hysteresis loop, dynamic hysteresis loop, magnetizing winding, eddy currents, automation.

При моделировании реальных систем управления возникает задача предварительной идентификации параметров используемых ферромагнитных элементов (трансформаторы, дроссели, статоры и роторы двигателей). Здесь привлекательным может оказаться способ автоматической регистрации статических гистерезисных петель [1]. Способ основан на возможности разделения физических явлений магнитного гистерезиса и вихревых то-

ков, когда действие последних может быть сведено к эквивалентному сопротивлению потерь на вихревые токи [2, 3]. Суть способа, реализованного средствами аналоговой техники, поясняется с помощью рис. 1.

Испытуемый ферромагнетик (сердечник трансформатора  $T$  на рис. 1) должен быть снабжен тремя обмотками: одной намагничивающей и двумя измерительными. Намагничивающая обмотка

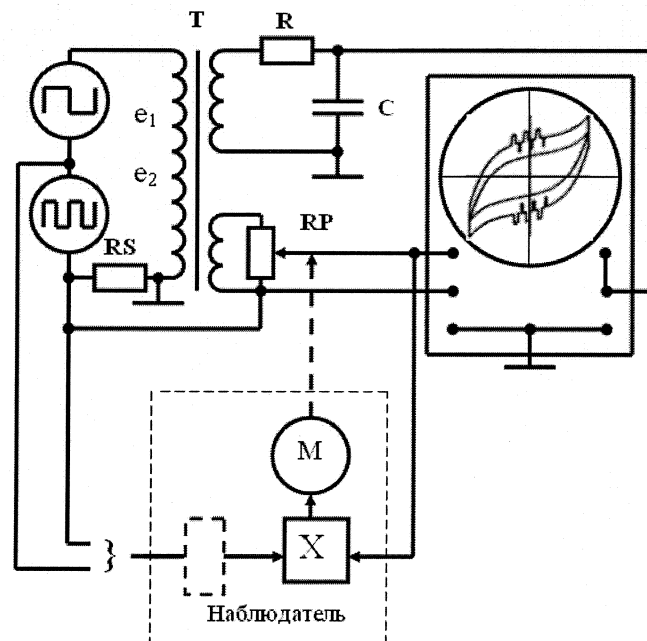


Рис. 1. Реализация способа средствами аналоговой техники

подключается к периодическому напряжению, представляющему сумму двух сигналов, имеющих разную частоту. Низкочастотная составляющая напряжения  $e_1$  имеет большую амплитуду и формирует основной цикл перемагничивания. Высокая частотная составляющая  $e_2$  должна иметь значительно меньшую амплитуду. Суммарное напряжение  $e_1 + e_2$  подается на первичную обмотку исследуемого трансформатора  $T$ , в цепь которого включен шунт  $RS$ .

На выходе одной из измерительных обмоток с помощью интегрирующей цепочки  $R, C$  формируется сигнал пропорциональный индукции магнитного поля и подается на вертикальные входы двухлучевого осциллографа. Сигнал пропорциональный напряженности магнитного поля, снимаемый с шунта  $RS$ , подается на один из горизонтальных входов осциллографа. Сигнал ЭДС другой вторичной обмотки  $T$ , при соответствующей подстройке, пропорционален влиянию вихревых токов. Сигнал снимается с помощью потенциометра  $RP$  и вычитается (при соответствующем подключении второй измерительной обмотки) из сигнала, снимаемого с шунта  $RS$ . Результирующий сигнал (назовем его уточненным сигналом напряженности) подается на второй горизонтальный вход осциллографа. На рис. 1 обозначен блок, именуемый «наблюдатель», который управляет перемещением движка  $RP$ . Термин «наблюдатель» в физике и в теории автоматического управления распространяется и на человека, и на автомат.

На экране осциллографа формируются два цикла перемагничивания: наружный динамический цикл без компенсации вихревых токов и внутренний квазистатический цикл при определенной степени компенсации вихревых токов. Если влияние вихревых токов не скомпенсировано, петля гистерезиса представляет из себя зависимость такого вида, что на основную монотонную кривую наложен «гребень», форма зубцов которого определяется формой напряжения высокочастотной составляющей. При «недокомпенсации» петля будет шире статической кривой намагничивания, при «перекомпенсации», наоборот, будет уже. В случае, когда вихревые токи полностью скомпенсированы подстройкой движка потенциометра  $RP$ , петля гистерезиса имеет гладкую монотонную форму. Полученная с помощью подстройки «гладкая» петля и является статической петлей гистерезиса для данного магнитного образца.

Работоспособность способа наглядно демонстрирует эксперимент, проведенный автором. С помощью данного способа была определена статическая петля гистерезиса сердечника трансформатора малой мощности. Схема опыта с небольшими отличиями совпадает со схемой рис. 1, поэтому нет смысла ее приводить. В отличие от схемы рис. 1 в опыте в качестве низкочастотной составляющей использовалось синусоидальное напряжение частотой 50 Гц с выхода автотрансфор-

матора. Высокая частотная составляющая напряжения с частотой кратной сетевой (частота около 1000 Гц, кратность достигалась подстройкой) формировалась генератором частоты. Кривые намагничивания снимались для двух вариантов формы высокочастотного напряжения: прямоугольные импульсы и синусоидальное напряжение. Осциллограф, используемый в опыте, был однолучевым. На рис. 2 приведена осциллограмма динамической петли гистерезиса, снятая при частоте 50 Гц, без высокочастотной составляющей.

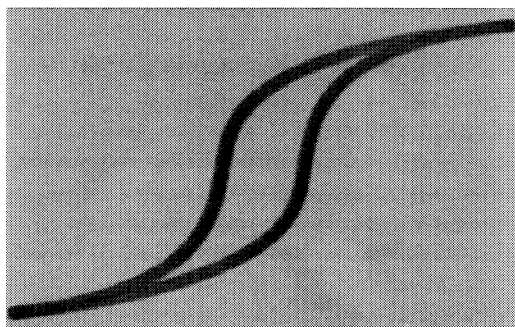


Рис. 2. Динамическая кривая перемагничивания сердечника трансформатора

На рис. 3 приведены осциллограммы последовательно с недокомпенсацией, полной компенсацией и перекомпенсацией вихревых токов. Высокая частотная составляющая напряжения сформирована прямоугольными импульсами.

На рис. 4 приведены осциллограммы последовательно с недокомпенсацией, полной компенсацией и перекомпенсацией вихревых токов для синусоидальной высокочастотной составляющей.

Сравнение кривых рис. 3 и рис. 4 показывает, что петля гистерезиса (средняя осциллограмма на обоих рисунках) при полной компенсации вихревых токов одинакова для двух разного вида высокочастотных сигналов. Таким образом, средняя осциллограмма и на рис. 3, и на рис. 4 является статической кривой перемагничивания исследуемого сердечника.

Для автоматизированного получения на экране осциллографа статической петли гистерезиса исследуемого образца требуется автомат с системой технического зрения и распознавания образов. В случае, когда «наблюдатель» на рис. 1 представлен автоматом, работа схемы происходит следующим образом. Уточненный сигнал напряженности умножается на высокочастотную составляющую  $e_2$  напряжения, питающего намагничивающую обмотку. Выход умножителя подается на машину постоянного тока  $M$ , вал которой перемещает бегунок потенциометра (делителя напряжения)  $RP$ . При положительном напряжении на выходе умножителя машина вращается в одну сторону со скоростью пропорциональной напряжению, при отрицательном напряжении – в другую. В режиме полной компенсации среднее значение произведения, или напряжение на машине, равно ну-



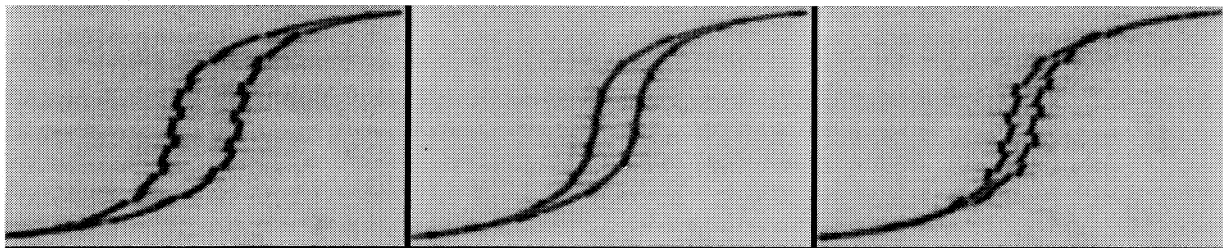


Рис. 3. Кривые перемагничивания с различной степенью компенсации вихревых токов при прямоугольных высокочастотных импульсах

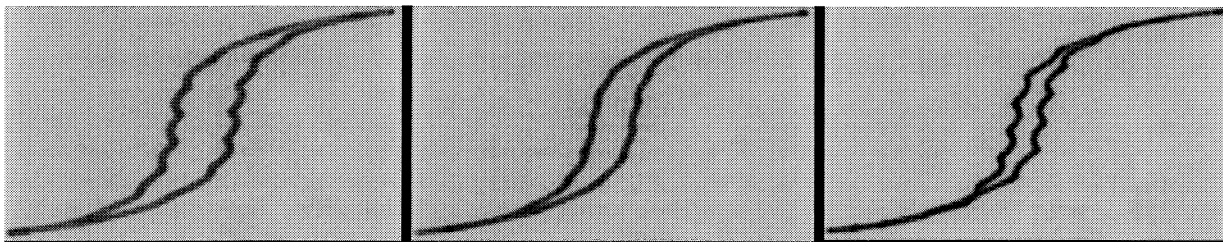


Рис. 4. Кривые перемагничивания с различной степенью компенсации вихревых токов при синусоидальной высокочастотной составляющей

лю, и машина останавливается. Усреднение произведения осуществляется механической инерцией машины и, таким образом, меняет величину до получения нулевого среднего значения произведения. Лучше всего следить за средним значением произведения двух упомянутых сигналов, когда они в начале цикла совпадают по фазе, поэтому полезно сдвинуть один из сигналов динамическим блоком коррекции (показан пунктиром внутри блока «наблюдатель»). Работоспособность автоматизированного способа определения статической петли гистерезиса, реализованного средствами аналоговой техники, подтвердилась при моделировании на ЭВМ.

Рассмотрим возможность реализации автоматизированного способа определения статической петли гистерезиса средствами цифровой техники и ЭВМ. На рис. 5 приведена функциональная схема устройства, осуществляющего данный способ. Устройство содержит намагничивающую обмотку с образцовым резистором  $R$ , измерительную об-

мотку, управляющую электронно-вычислительную машину ЭВМ, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, двухвходовой аналого-цифровой преобразователь АЦП. Кодовый вход ЦАП подключен к выходу ЭВМ, а аналоговый выход – к намагничивающей обмотке. К первому аналоговому входу АЦП подключен выход измерительной обмотки, ко второму аналоговому входу АЦП подключен сигнал с образцового резистора. Кодовый выход АЦП подключен к входу ЭВМ. В устройстве ЭВМ выполняет все функции формирования сигнала возбуждения, измерения сигналов с обмоток образца, выполнения всех математических операций, включая операции наблюдателя, регистрации результатов в своей памяти и вывод их на экран монитора. При этом сохраняется возможность возложения функции наблюдателя на человека, который смотрит на экран монитора и корректирует значения коэффициента подстройки.

Человек может оперативно менять сложную форму сигнала возбуждения в рамках предложен-

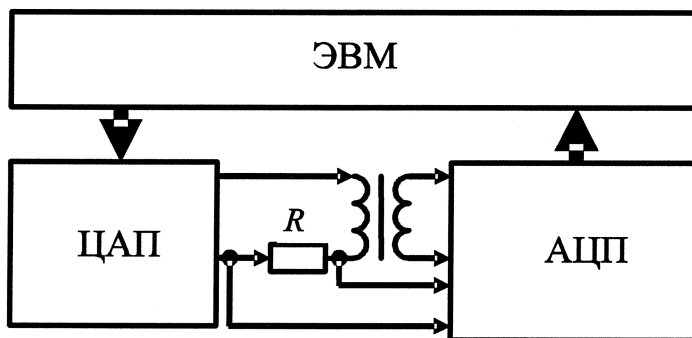


Рис. 5. Реализация способа средствами цифровой техники

ного способа. При перемагничивании магнитного образца на измерительных обмотках наводится ЭДС пропорциональная производной индукции. Интегрирование ЭДС позволяет получить сигнал пропорциональный индукции. В схеме рис. 1 роль интегратора выполняет RC-цепочка, в схеме рис. 5 интеграл вычисляет ЭВМ численными методами. В любом случае входное сопротивление интегрирующей цепочки или АЦП должно быть таким большим, чтобы их входные токи не влияли на процессы перемагничивания.

### *Литература*

1. Патент РФ № 2376610.G01R33/14. Способ регистрации гистерезисной петли / Лохов С.П., Сивкова А.П. Приоритет 23.06.2008. Опубликовано 20.12.2009.
2. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей / Г.И. Атабеков. – М.: Энергия, 1969. – С. 194, 196.
3. Лохов, С.П. Разработка и исследование тиристорных регуляторов мощности нагревательных установок: дис. ... канд. техн. наук / С.П. Лохов. – Челябинск, 1972. – 182 с.

*Поступила в редакцию 15.01.2010 г.*

**Сивкова Анна Прокопьевна** – ассистент кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электротехника, силовая электроника. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Sivkova Anna Prokopievna** is assistant of the Electrical Drive Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electrical engineering and power electronics. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Лукин, Г.В. Шурьгина\*, В.В. Головин\*\**

*\* г. Магнитогорск, МГТУ,*

*\*\* ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»*

## EXPERIMENTAL RESEARCHES OF TWO-ZONAL SPEED CONTROL THYRISTOR ELECTRIC DRIVES WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS

*A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, A.A. Lukin, G.V. Shurygina\*, V.V. Golovin\*\**

*\* Magnitogorsk, MSTU,*

*\*\* Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works»*

Представлено описание разработанных систем двухзонного регулирования скорости, обеспечивающих улучшение энергетических показателей тиристорных электроприводов прокатных станов за счет перераспределения запаса выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя в установившемся и динамических режимах. Дано описание лабораторной установки, представлены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие возможность снижения запаса выпрямленной ЭДС.

*Ключевые слова:* прокатный стан, электропривод, энергетические показатели, способы улучшения, экспериментальные исследования.

The disruption of the two-zonal speed control developed systems is presented. They provide the improvement of energy index of rolling mills thyristor electric drives at the expense of redistribution of the thyristor converter EMF rectification reserve in stable and dynamic modes. The description of the laboratory set is given. The results of experimental researches, varifying the opportunity of EMF rectification reserve reduction are represented (introduced).

*Keywords:* rolling mill, electric drive, energy index, improvement methods, experimental researches.

К тиристорным электроприводам чистой группы широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) предъявляются жесткие требования в отношении обеспечения надежности и высокого быстродействия в динамических режимах. Наиболее тяжелыми динамическими режимами являются:

- режим ударного изменения нагрузки в момент захвата полосы;
- разгон, возникающий при прокатке с ускорением.

Безаварийная работа ЭП может быть обеспечена лишь в том случае, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), будут обеспечены в названных динамических режимах. Дополнительное увеличение запаса обеспечивает увеличение надежности ЭП, однако приводит к ухудшению энергетических показате-

лей за счет увеличения потребления реактивной мощности, зависящей от степени регулирования выпрямленной ЭДС.

Теоретические и экспериментальные исследования динамических режимов главных электроприводов ШСГП 2000 позволили определить уровень потребляемой реактивной мощности, составляющий 0,6–1,2 Мвар на клеть, что приводит к потерям электрической энергии в пределах 1,3–2 млн кВт·ч/год. Такие потери предопределяют необходимость проведения мероприятий по уменьшению потребления реактивной энергии.

С целью ограничения запаса в динамическом режиме разгона при наличии металла в валках, т. е. при относительно плавном увеличении тока нагрузки разработаны способ и система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразо-

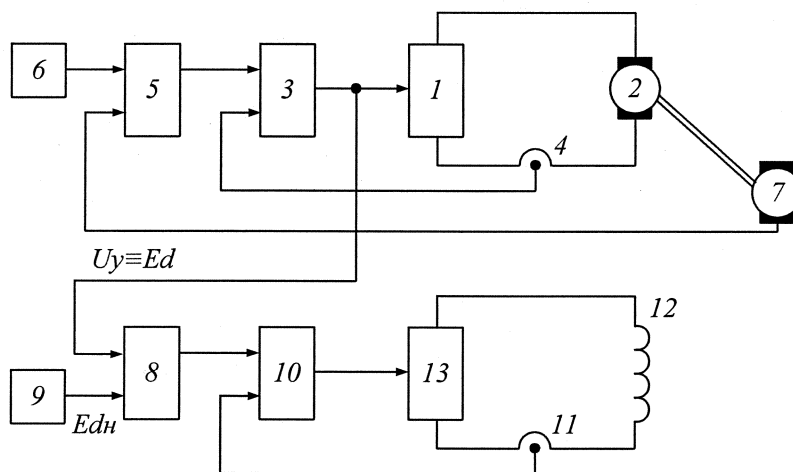


Рис. 1. Функциональная схема системы управления потоком возбуждения в функции выпрямленной ЭДС: 1 – тиристорный преобразователь; 2 – якорь двигателя; 3 – регулятор тока якорной цепи; 4 – датчик тока; 5 – регулятор скорости; 6 – задатчик интенсивности; 7 – тахогенератор; 8 – регулятор ЭДС; 9 – задатчик выпрямленной ЭДС; 10 – регулятор тока возбуждения; 11 – датчик тока возбуждения; 12 – обмотка возбуждения; 13 – тиристорный возбудитель

вателя, согласно которым задающее воздействие на регулятор внешнего контура в цепи возбуждения формируется пропорциональным номинальной выпрямленной ЭДС ТП [1]. Функциональная схема системы регулирования, реализующей предложенный способ, представлена на рис. 1. Обратная связь подается с выхода регулятора тока якорной цепи, что позволяет исключить применение датчика выпрямленной ЭДС и за счет этого упростить устройство.

В установившемся режиме работы под нагрузкой регулятор выпрямленной ЭДС обеспечивает постоянство последней на заданном номинальном уровне независимо от тока нагрузки. Напряжение на якоре и ЭДС двигателя с ростом тока уменьшаются вследствие увеличения падений напряжения на соответствующих внутренних сопротивлениях. При этом величина запаса выпрямленной ЭДС ТП остается постоянной независимо от тока нагрузки. Вследствие этого при всех значениях тока в диапазоне от нуля до номинального в разработанной системе обеспечивается меньший уровень запаса и соответственно лучшие энергетические показатели работы ЭП.

Применение предложенного способа рекомендуется для электроприводов прокатных станов, работающих в широком диапазоне токов нагрузки при относительно плавном ее изменении. Для главных ЭП ШСПП данный способ позволяет исключить увеличение выпрямленной ЭДС выше заданного номинального значения при ускорении во время прокатки и за счет этого обеспечивает возможность снижения запаса выпрямленной ЭДС.

Однако быстродействие системы регулирования ЭДС по цепи возбуждения двигателя при традиционных настройках регуляторов примерно на порядок ниже быстродействия системы регулирования скорости, что не позволяет обеспечить огра-

ничения выпрямленной ЭДС при ударном приложении нагрузки. В связи с этим разработан способ зависящего управления током возбуждения в функции выпрямленной ЭДС ТП с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС [2]. Суть предложенного способа поясняется с помощью временных диаграмм, представленных на рис. 2, которые показывают характер переходных процессов тока  $I$ , ЭДС двигателя  $E$  и выпрямленной ЭДС  $E_d$  при ударном приложении нагрузки в момент  $t=0$ , а также при плавном увеличении нагрузки в промежутке времени  $t_2 \div t_3$ .

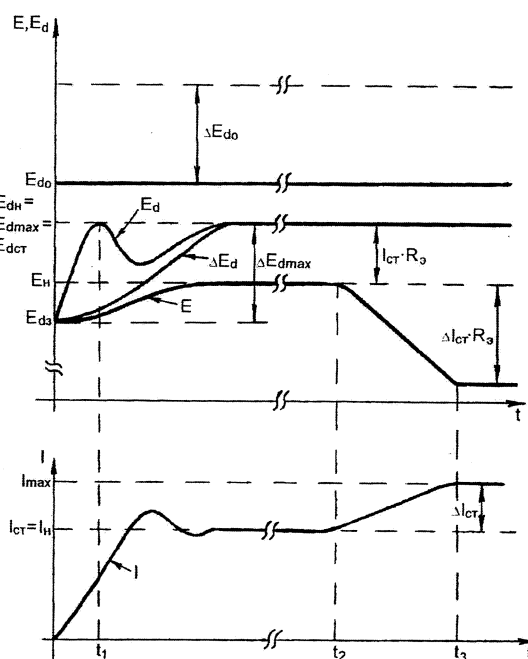


Рис. 2. Временные диаграммы тока, ЭДС двигателя и выпрямленной ЭДС в системе с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС ТП

Задание выпрямленной ЭДС  $E_{d3}$  тиристорного преобразователя устанавливается ниже номинальной выпрямленной ЭДС  $E_{dH}$  на величину ее перерегулирования  $\Delta E_{d \max}$  при ударном приложении нагрузки, определяемую по зависимости [3]

$$E_{d \max} = L_{\Sigma} \frac{1}{k_1 T_T a} I_{CT},$$

где  $T_T$  – постоянная времени контура тока;  $a$  – отношение постоянных времени контуров скорости и тока;  $I_{CT}$  – установившийся (статический) ток.

Ударное приложение нагрузки, происходящее в момент времени  $t=0$ , сопровождается ростом тока  $I$  до установившегося значения  $I_{CT}$ , равного номинальному току  $I_H$ . Выпрямленная ЭДС (кривая  $E_d$ ) получает приращение  $\Delta E_d$ , которое предлагается осуществлять по аperiodическому закону. В результате она повышается до номинального уровня  $E_{dH}$  без перерегулирования (кривая  $E_d$  в момент времени  $t_1$  не превышает  $E_{dH}$ ). ЭДС  $E$  электродвигателя, которая в режиме холостого хода соответствует заданию  $E_{d3}$ , также повышается до своего номинального уровня  $E_H$  и поддерживается на данном уровне при установившемся токе нагрузки  $I_{CT}$ , не превышающем  $I_H$  (т. е. до момента времени  $t_2$ ). При росте тока выше номинального (промежуток времени  $t_2 \div t_3$ ) по-прежнему обеспечивается поддержание выпрямленной ЭДС  $E_d$  тиристорного преобразователя на уровне  $E_d = E_{dH}$  за счет снижения ЭДС электродвигателя  $E$  на величину падения напряжения  $\Delta I_{CT} R_{\Sigma}$  на эквивалентном сопротивлении  $R_{\Sigma}$  в цепи выпрямленного тока, здесь  $\Delta I_{CT}$  соответствующее приращение тока нагрузки.

На рис. 3 показано подключение дополнительных узлов системы управления, позволяющих обеспечить данный способ регулирования. Суммарный сигнал на входах функционального преобразователя ФП равен разности  $E_{d3} - E_{dH}$ . При отсутствии статической нагрузки (при равенстве нулю сигнала на выходе датчика статического тока ДСТ) управляемый ключ УК замкнут и шунтирует

выход функционального преобразователя. Его выходной сигнал в этом режиме равен нулю, а величина выпрямленной ЭДС ТП в соответствии с заданием устанавливается равной

$$E_{d3} = E_{dH} - (L_{\Sigma} / (k_1 \cdot T_T \cdot a) I_{CT \max}),$$

т. е. уменьшается относительно номинального значения на величину максимального перерегулирования выпрямленной ЭДС ТП при ударном приложении нагрузки.

В момент ударного приложения нагрузки изменяется суммарный сигнал задания на входах регулятора ЭДС РЭ и выпрямленная ЭДС тиристорного преобразователя повышается до номинального уровня  $E_{dH}$  по аperiodическому закону. Регулятор ЭДС поддерживает значение выпрямленной ЭДС, равным  $E_{dH}$  в течение всего времени работы под нагрузкой независимо от величины нагрузки. Поскольку в предложенном способе управления потоком возбуждения отработка ударного приложения нагрузки происходит без перерегулирования выпрямленной ЭДС  $E_d$  тиристорного преобразователя, и кроме того, обеспечивается стабилизация выпрямленной ЭДС на заданном (номинальном) уровне при токе нагрузки, превышающем номинальный, выпрямленная ЭДС  $E_{d0}$  при нулевом угле управления может быть снижена на величину максимального приращения  $\Delta E_{d0} = \Delta E_{d \max}$ , т. е. на 16–22 % (см. рис. 2). Запас выпрямленной ЭДС ТП, необходимый для безаварийной отработки ударного приложения нагрузки, при этом будет обеспечен. После отработки динамического режима, когда необходимость в составляющей  $\Delta E_{d \max}$  исключается, его величина автоматически уменьшается за счет повышения задания  $E_{d3}$  до номинального уровня, соответствующего номинальной выпрямленной ЭДС  $E_{dH}$ . Данный уровень ЭДС далее поддерживается постоянным независимо от величины тока нагрузки.

Предложенные системы двухзонного регулирования скорости электроприводов прокатных станов обеспечивают возможность снижения запаса

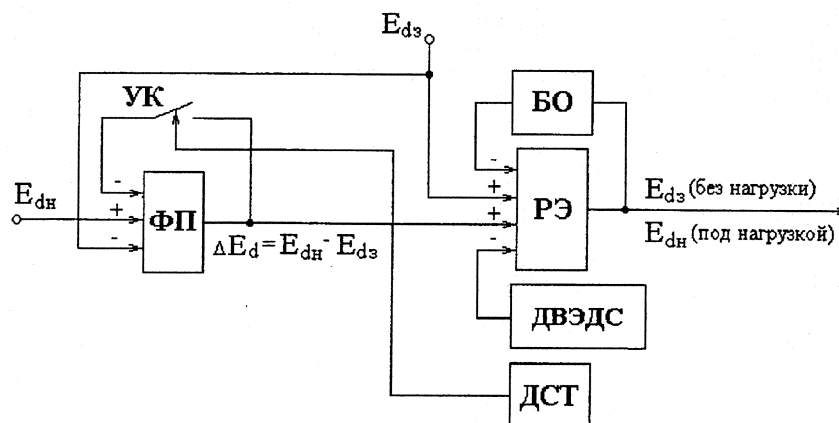


Рис. 3. Функциональная схема системы с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя: ДВ ЭДС – датчик выпрямленной ЭДС, ДСТ – датчик статического тока, УК – управляемый ключ

са выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя практически без ухудшения динамических показателей и надежности работы электропривода.

Для их исследования необходима разработка действующей лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

С целью исследования динамических режимов создана лабораторная установка, снабженная системой двухзонного регулирования скорости, выполненная на базе реверсивного тиристорного преобразователя типа КТЭ-100-220-922-1-УХЛ4. Силовая схема установки представлена на рис. 4. Применение двухмашинного агрегата и механического тормоза обеспечивает возможность как ударного, так и плавного изменения нагрузки. В качестве исполнительного механизма применен двигатель с номинальным якорным напряжением 220 В и током 14,5 А. Питание обмотки возбуждения осуществляется от тиристорного преобразователя типа ДТО ВВ 13 DGG 400/25 (выпрямленное напряжение  $\pm 400$  В, номинальный выпрямленный ток 25 А).

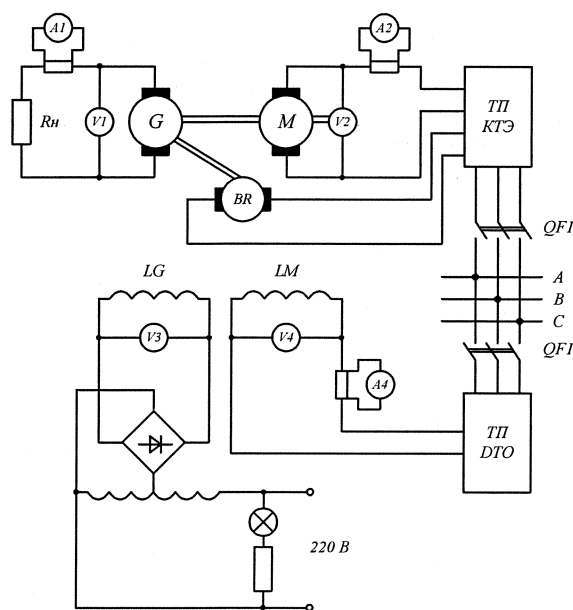


Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки с двухзонным регулированием скорости

Система двухзонного регулирования выполнена на базе ячеек, входящих в комплект названных преобразователей. За счет переключения связующего параметра между системой управления напряжением якорной цепи и системой возбуждения осуществляется зависимое регулирование скорости в функции ЭДС двигателя либо в функции выпрямленной ЭДС ТП. Структура и настройка регуляторов систем регулирования скорости и ЭДС соответствуют принятым для электропривода стана 2000. САР скорости выполнена двухконтурной однократноинтегрирующей с настройкой П-регулятора скорости на модульный оптимум, САР ЭДС (либо

выпрямленной ЭДС) выполнена двухконтурной с интегральным регулятором ЭДС. При осуществлении зависимого управления в функции выпрямленной ЭДС в качестве сигнала обратной связи используется выходной сигнал регулятора тока якорной цепи, как это показано на рис. 1.

Кроме исследований отдельных динамических режимов было выполнено моделирование процессов за цикл прокатки (ударное приложение нагрузки, работа на установившейся скорости под нагрузкой, ускорение электропривода, сброс нагрузки). Управление осуществлялось с помощью компьютера, перечисленные режимы задавались в систему управления программно.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований электропривода:

- в существующей системе зависимого регулирования скорости в функции ЭДС двигателя (рис. 5, а);

- в разработанной системе зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС ТП (рис. 5, б);

- в разработанной системе зависимого регулирования скорости с автоматическим изменением задания выпрямленной ЭДС ТП (рис. 5, в).

Приведены осциллограммы переходных процессов скорости  $\omega$ , тока якорной цепи  $I$ , потока возбуждения  $\Phi$ , ЭДС двигателя  $E$  и выпрямленной ЭДС  $E_d$  тиристорного преобразователя. Кривые представлены в относительных единицах, за базисные приняты номинальные значения перечисленных параметров. В результате сравнения представленных осциллограмм сделаны следующие выводы:

- переходные процессы скорости и тока во всех трех случаях имеют практически идентичный характер, соответствующий реальным процессам в электроприводе чистой клетки широкополосного стана;

- в известной системе ДЗРС в функции ЭДС двигателя в динамических режимах возникает превышение выпрямленной ЭДС ТП над номинальным значением;

- в первой разработанной системе (см. рис. 5, б) в режиме работы электропривода без нагрузки в интервалах времени  $t=(1,5\div 2)$  с и  $t=(6\div 6,5)$  с ЭДС электродвигателя превышает номинальное значение, что может привести к перенапряжению на якоре двигателя;

- во второй разработанной системе (рис. 5, в) в исследуемых динамических режимах не происходит превышения выпрямленной ЭДС ТП над номинальным значением, что позволяет снизить максимальную выпрямленную ЭДС ТП и обеспечить за счет этого улучшение энергетических показателей электропривода.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований разработанных систем на действующей лабораторной установке подтверждены

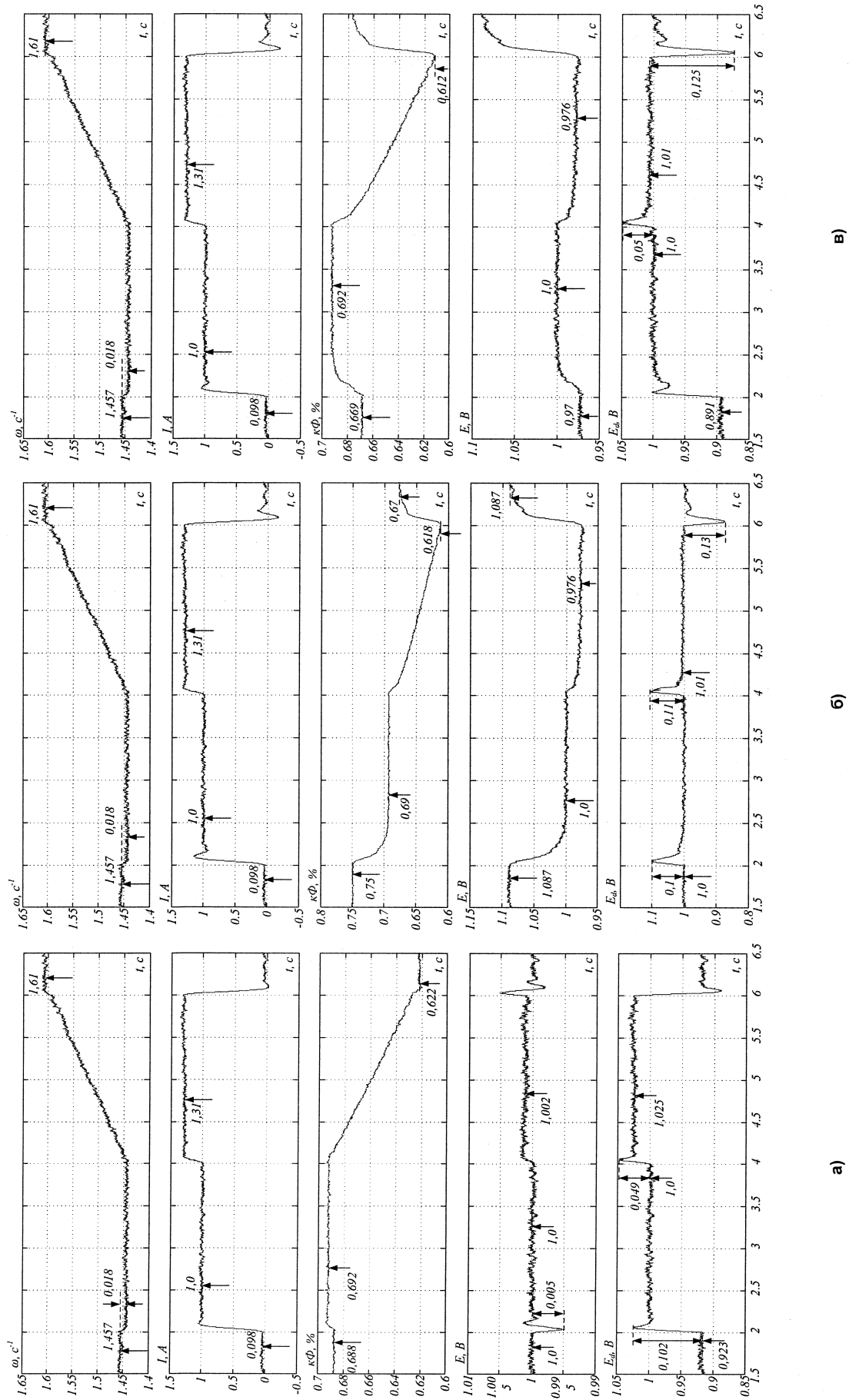


Рис. 5. Результаты моделирования режимов электропривода клетки в системах зависимого регулирования:  
а – в функции  $E$ ; б – в функции  $E_{\alpha}$ ; в – в функции  $E$  с переменной уставкой

работоспособность разработанных систем ДЗРС в функции выпрямленной ЭДС ТП.

Разгон под нагрузкой в системе ДЗРС (см. рис. 1) происходит без превышения выпрямленной ЭДС  $E_d$  установившегося номинального значения, (рис. 5, б). Переходные процессы скорости, тока и потока возбуждения идентичны процессам в действующей системе двухзонного регулирования в функции ЭДС двигателя. Однако как следует из осциллограмм, начальный момент разгона ЭП ( $t=4$  с) сопровождается перерегулированием выпрямленной ЭДС ТП, достигающим 14–22 %. Это требует дальнейшей разработки технических решений, обеспечивающих снижение запаса выпрямленной ЭДС в динамических режимах.

Меньшее соотношение выпрямленной ЭДС  $E_{act}$  в установившемся режиме работы под нагрузкой (на рис. 2  $E_{act} = E_{dH}$ ) и максимальной выпрямленной ЭДС  $E_{d0}$  определяет более высокий коэффициент мощности в установившемся режиме и соответственно меньшие потери электрической энергии. Поскольку запас, необходимый в динамических режимах, сохраняется, показатели надежности электропривода остаются на требуемом высоком уровне.

Для вновь проектируемых ЭП улучшение энергетических показателей при применении рассмотренных систем двухзонного регулирования обеспечивается за счет рационального выбора вторичного напряжения преобразовательного трансформатора. По сравнению с напряжением, принимаемым в известных электроприводах подобного класса, его рекомендуется снизить на 10–12 % [4]. Это позволяет уменьшить потребление реактивной мощности на 7–12 %, т. е. практически без капи-

тальных затрат добиться снижения потерь электрической энергии. Для главных ЭП эксплуатируемых широкополосных станов горячей прокатки практически тот же эффект может быть обеспечен за счет переключения (либо установки дополнительных) отпаек вторичных обмоток трансформаторов.

### Литература

1. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин и др. // «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2004). – Магнитогорск, 2004. – Ч. 2. – С. 260–264.

2. Головин, В.В. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храшкин // Изв. вузов. «Электромеханика». – 2006. – № 4. – С. 35–39.

3. Неймарк, В.Е. Методика определения динамического запаса напряжения систем стабилизации скорости электроприводов постоянного тока / В.Е. Неймарк // Электротехническая промышленность. Сер. «Электропривод». – 1971. – № 7. – С. 15–16.

4. Головин, В.В. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения. / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храшкин // Изв. вузов. «Электромеханика». – 2006. – № 4. – С. 40–45.

Поступила в редакцию 15.04.2009 г.

**Карандаев Александр Сергеевич** – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет» им. Г.И. Носова. Телефон: 8-(3519) 29-84-34.

**Karandaev Alexander Sergeevich** – Dr. Sci., professor, superintendent faculty electrical engineers and electrotechnical systems of Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk. The contact phone: 8-(3519) 29-84-34.

**Храшкин Вадим Рифатович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

**Khramshin Vadim Rifhatovich** – Cand. Tech. Sci., the associate professor of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

**Лукин Александр Андреевич** – аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем, ГОУ ВПО «МГТУ».

**Lukin Alexander Andreevich** – post-graduate student of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

**Шурыгина Галина Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

**Shurygina Galina Vladimirovna** – Cand. Tech. Sci., the associate professor of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

**Головин Вячеслав Васильевич** – кандидат техн. наук, начальник центральной электротехнической лаборатории ОАО «ММК». Телефон : 8-(3519) 29-09-12.

**Golovin Vyacheslav Vasiljevich** – Cand. Tech. Sci., the chief of the central electrotechnical laboratory of Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works». The contact phone: 8-(3519) 29-09-12.



# АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 537.39: 537.5

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ\*

*Г.Ф. Кузнецов, Д.Г. Клещев, В.В. Крымский, С.И. Лаврентьев, С.Ю. Гуревич  
г. Челябинск, ЮУрГУ*

## ON THE POSSIBILITY OF ENERGY GENERATION IN ELECTRICAL DISCHARGES

*G.F. Kuznetsov, D.G. Kleshchev, V.V. Krymsky, S.I. Lavrentiev, S.Y. Gurevich  
Chelyabinsk, SUSU*

Описана экспериментальная установка и результаты исследования возможности получения тепловой и электрической энергии при электрических разрядах большой мощности в водно-солевых растворах.

*Ключевые слова:* разряд, раствор, импульс, энергия.

The experimental assembly and the research results of possibility of thermal and electric energy generation in electrical high-power discharges in the salt aqueous solutions are described.

*Keywords:* discharge, solution, pulse, energy.

В работе И.В. Курчатова [1] указаны два направления проведения термоядерных реакций: стационарные и импульсные. Теоретически было предположено, что при импульсных разрядах в дейтерии с токами более 300 кА может появиться нейтронное излучение термоядерного происхождения.

Экспериментально было исследовано действие электрического разряда на газы: водород, дейтерий, гелий, аргон, ксенон и их смеси. Во время разряда измерялись нейтронный поток и уровень рентгеновского излучения. Обнаружено, что при разряде в дейтерии возникают нейтронный импульс и синхронно с ним жесткое рентгеновское излучение с энергией 300...400 кэВ. В плазме разряда, по оценке автора, температура достигает  $10^6$ °С.

Из различных работ, которые описывают установку для получения энергии в электрическом разряде, следует отметить работы А.В. Вачаева и Н.И. Иванова [2, 3, 4, 5]. В работе [2] используется разряд постоянного тока, в [4] – переменного, в [5] – оба вида токов. Гидравлические и электрические схемы установки, работающей на переменном и постоянном токах приведены в [5]. В работе [4] приведены энергетические характеристики установки на переменном токе.

В работах [6, 7] описан способ генерирования и конструкция генератора нейтронных импульсов. Суть способа заключается в том, что на разрядную камеру с плазменным фокусом, которая заполнена дейтерием или смесью дейтерий-третий подаётся ионизирующий токовый импульс 100–500 А длительностью 20–100 нс. Далее с задержкой 30–150 нс подаётся основной высоковольтный импульс (25 кВ, 500 кА), после чего возникает импульс нейтронного излучения с выходом более  $10^{11}$  нейтронов в импульсе в зависимости от условий разряда и конструкции камеры. Это означает, что в камере происходит реакция ядерного синтеза с выделением нейтронов и энергии. Реальность существования и работоспособности этого устройства подтверждается предложением продажи нейтронных генераторов различных типов, производимых ВНИИА им. Духова [8].

По вышеизложенному и целому ряду других источников можно сделать однозначный вывод: существует экспериментально подтвержденная в различных научных организациях возможность получения дополнительной энергии в электрическом разряде.

Для проверки возможности создания нового источника электрической энергии на основе элек-

\*В порядке обсуждения.

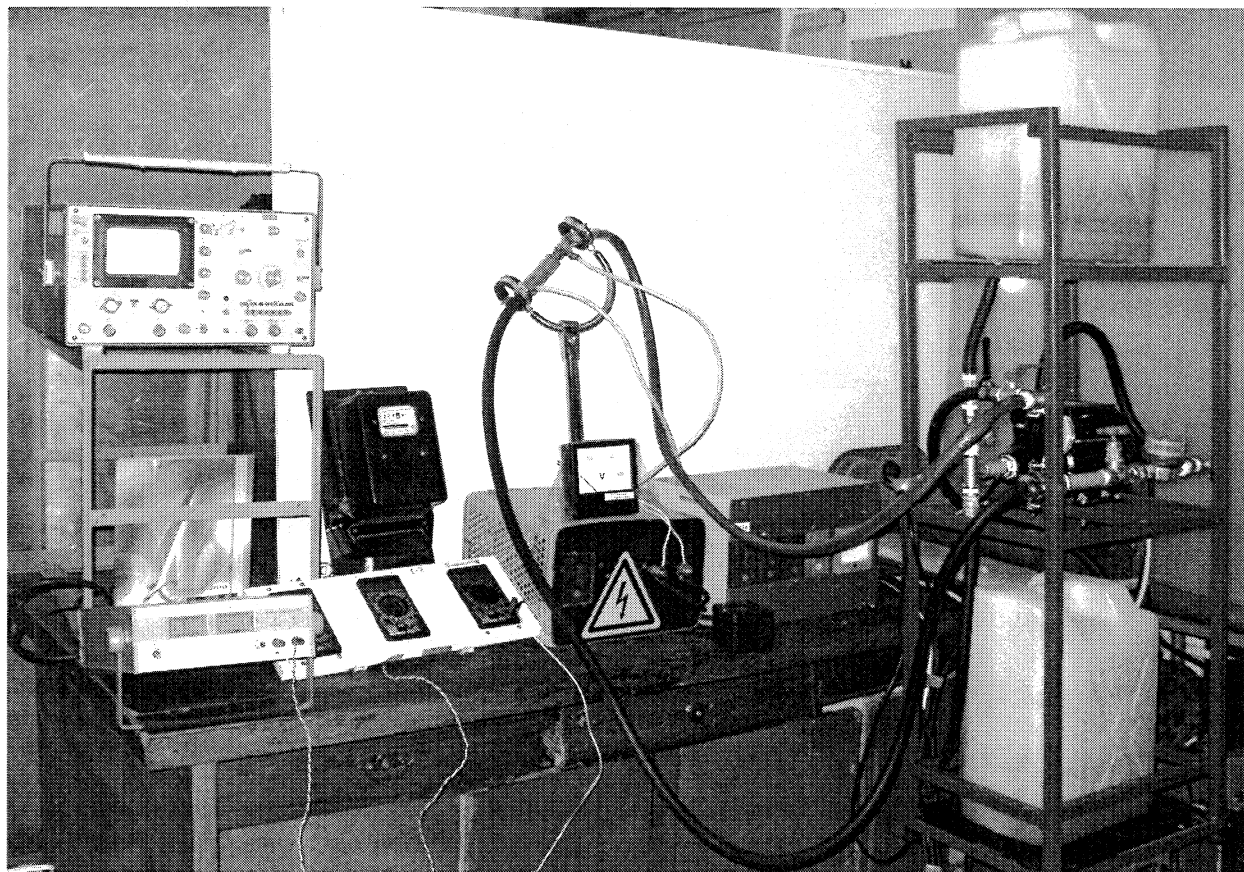


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для исследования энергетических процессов

трического разряда в потоке водно-солевого раствора была разработана и смонтирована экспериментальная установка, основными структурными элементами которой являются: реактор для создания электрического разряда; гидросистема для питания реактора водно-солевым раствором; электротехническое оборудование; комплект средств измерений (рис. 1).

Конструкция реактора приведена на рис. 2. В корпус 1, изготовленный из оргстекла, ввинчены два трубчатых стабилизирующих электрода 2, 3. В средней части реактора размещена керамическая

вставка 6, проходное сечение которой имеет меньший диаметр, нежели сечение корпуса реактора. Этим обеспечивается увеличение скорости потока водно-солевого раствора. Именно в месте сужения сечения располагаются окончания иницирующих электродов 4, 5. Реактор может быть снабжен катушкой 7 для создания магнитного поля.

Гидросистема смонтирована на раме из металлического уголка и содержит следующие узлы: бак подачи раствора, кран подачи, центробежный насос, питаемый напряжением 220 В, давление на выходе 4 атм, максимальный расход раствора

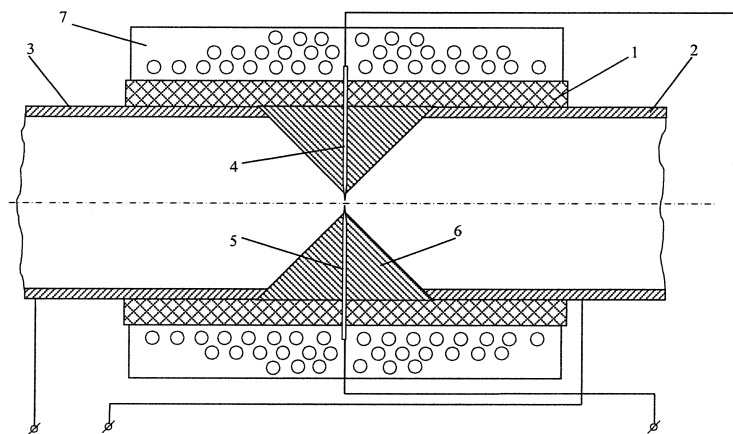


Рис. 2. Конструкция реактора

0,3 кг/с, счётчик подачи раствора механический, регулирующий вентиль, манометр, бак приемный, сливной кран, раму.

Из подающего бака раствор самотеком через кран поступает в насос. Насос прокачивает раствор через счётчик, регулирующий вентиль и реактор. Давление раствора на входе в реактор определяется по манометру, средний расход – по счётчику. Из реактора раствор поступает в приемный бак, либо в другие приемные ёмкости (если необходим химический анализ раствора, прошедшего через реактор). Упрощенная электрическая схема установки приведена на рис. 3.

Для определения комплексных характеристик экспериментальной установки использовалось следующее электротехническое оборудование: терморезисторы ХА; блок мультиметров DT838; счётчик электрической энергии САЧУ-И672М; источник питания постоянного тока Б5-43; вольтметр М381; амперметр М42100.

Трёхфазное электрическое напряжение величиной 380 В из электрической сети подаётся на регулируемый тиристорный выпрямитель, который позволяет получить на его выходе постоянное напряжение от 270 до 530 В. Этим напряжением заряжается конденсатор С. Балластное сопротивление R6 ограничивает ток в электрической цепи величиной 50 А, что соответствует максимальному значению тока в случае короткого замыкания цепи внутри реактора Р. Конденсатор разряжается на электроды реактора с образованием электрических разрядов. Для исследований был изготовлен из оргстекла реактор, имеющий форму цилиндра (внутренний диаметр – 30 мм, длина – 100 мм). В основания цилиндра ввинчены проточные трубчатые электроды внутренним диаметром 8 мм. Обращённые друг к другу концы электродов проточены до диаметра 12 мм. В хвостовой части электродов имеются контактные шпильки для крепления проводов электропитания и штуцеры для подсоединения шлангов подачи раствора электролита.

В опытах использовали электроды, изготовленные из катодной меди марки М1к (ГОСТ 859–2001), а также из графита марки ISEM-1. Площадь электродов составляла ~60 мм<sup>2</sup>; начальный зазор между ними – 1,0±0,1 мм. В качестве электролита использовали растворы хлорида натрия и гидроксида натрия в дистиллированной воде. Напряжение U варьировали от 270 до 530 В, ёмкость конденсатора С – от 50 до 400 мкФ, концентрацию растворов – от 0,05 до 0,25 моль/дм<sup>3</sup>, скорость подачи раствора – от 0,1 до 0,9 дм<sup>3</sup>/мин. При разряде наблюдалась эрозия поверхностного слоя электродов, что приводило к увеличению зазора между электродами до 1,5 мм в опытах с медными и до 2,0 мм в опытах с графитовыми электродами.

Температура раствора после реактора с течением времени постепенно увеличивалась от T<sub>0</sub>, приближаясь к своему постоянному значению T, и далее не изменялась. Время достижения стационарного значения температуры при данной скорости подачи электролита составило 270 с. За изменение температуры ΔT при расчете теплоты Q, необходимой для нагрева электролита принята величина ΔT = T – T<sub>0</sub>.

Эксперименты показали (табл. 1), что при подаче на реактор напряжения U ≥ 300 В в реакторе возникают электрические разряды в виде кратковременных ярких вспышек белого цвета, частота которых зависит от следующих основных параметров: а) величины подаваемого напряжения, б) величины ёмкости конденсатора С; в) концентрации электролита в растворе; г) скорости подачи в реактор раствора; д) величины зазора между электродами. При этом амперметром А2 фиксируется пере-

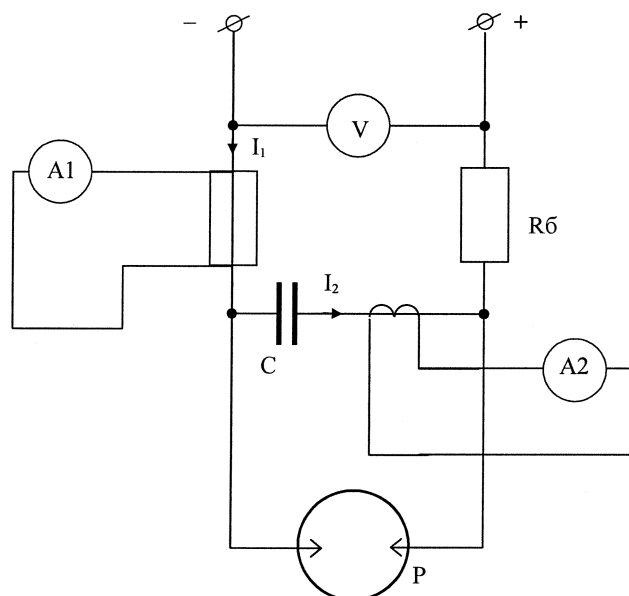


Рис. 3. Электрическая схема установки

Параметры и показатели работы экспериментальной установки

Параметры	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
1. Напряжение $U$ , В	350	530	350	350	530	350
2. Емкость конденсатора, мкФ	200	200	50	100	400	200
3. Концентрация электролита, моль/дм <sup>3</sup>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,05
4. Скорость подачи раствора, дм <sup>3</sup> /мин	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
5. Постоянный ток $I_1$ , А	7	12	1	5	4	3
6. Переменный ток $I_2$ , А	30–70	80–120	< 5	20–50	25–30	20–60

Таблица 2

Энергетический баланс

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
	( $C_{\text{NaCl}} = 0,09$ моль/дм <sup>3</sup> )	( $C_{\text{NaCl}} = 0,17$ моль/дм <sup>3</sup> )	( $C_{\text{NaCl}} = 0,25$ моль/дм <sup>3</sup> )
1. $W_э$ , МДж	0,36	1,01	0,36
2. Объем раствора, дм <sup>3</sup>	1,6	5,0	1,7
3. $\Delta T$ , °С	30–35	50	60
4. $Q$ , МДж	0,235	1,05	0,43
5. $W_к$ , Дж	3,2	10	3,4
6. $A_r$ , Дж	800	2400	800
7. $W_{эн}$ , Дж	2700	8000	2700
8. Коэффициент энергоотдачи $Q/W_э$ , отн./ед.	0,7	1,0	1,2

менный электрический ток  $I_2$  через конденсатор  $C$  (в дальнейшем вторичная электрическая цепь), величина которого зависит от конкретных параметров работы установки и может изменяться по своей величине от 20 до 300 А (частота тока  $I_2$  составляет 10–15 кГц). Отметим, что по своей величине ток  $I_2$  значительно больше тока  $I_1$ .

Проведенный анализ экспериментальных данных, показывает, что величина тока  $I_2$  изменяется симбатно с величинами подаваемого напряжения  $U$ , емкости конденсатора  $C$  и концентрации электролита в водном растворе. Зависимость  $I_2$  от скорости подачи электролита ( $V$ ) через реактор не монотонна: при малых скоростях подачи величина  $I_2$  изменяется симбатно с ростом  $V$  (диапазон значений  $0,1 \text{ дм}^3/\text{мин} < V < 0,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$ ), при  $V = 0,4–0,5 \text{ дм}^3/\text{мин}$  достигает максимального значения, а далее уменьшается при дальнейшем увеличении скорости подачи электролита через реактор.

Для составления комплексных энергетических характеристик процессов, реализующихся при электрическом разряде в растворах электролитов, были проведены оценочные исследования баланса электрической энергии, подводимой к экспериментальной установке, и идущей на нагрев электролита и другие физико-химические процессы. Результаты представлены в табл. 2.

В таблице использованы следующие обозначения:  $W_э$  – поступившая на вход установки электрическая энергия;  $\Delta T$  – изменение температуры электролита;  $Q$  – тепловая энергия, которая пошла на нагрев электролита;  $W_к$  – кинетическая энергия движения электролита;  $A_r$  – работа, идущая на пре-

одоление гидродинамического сопротивления гидравлической цепи;  $W_{эн}$  – энергии электромагнитного излучения.

Обращает на себя внимание опыт 3, в результате которого коэффициент энергоотдачи превысил единицу. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают возможность получения энергии при электрическом разряде с повышенным коэффициентом энергоотдачи.

### Литература

1. Курчатова, И.В. О возможности осуществления термоядерных реакций в электрическом разряде / И.В. Курчатова // *Атомная энергия*. – 1956. – Вып. 3. – С. 65–75.
2. Механизм и энергетика фазовых переходов: учебное пособие / А.В. Вачаев, Н.И. Иванов, Г.А. Павлова, А.И. Иванов // *Магнитогорск: МГМА*, 1996. – 74 с.
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, Г.А. Павлова. – Заявл. 31.05.94 // *Изобретения*. – 1997. – № 32. – С. 369.
4. Основные положения дейтонной горно-металлургической технологии / Н.И. Иванов, А.В. Вачаев, Г.А. Павлова, Л.А. Скворцов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1998. – № 4. – С. 54–59.
5. Взаимопревращения химических элементов / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Б.В. Болотов и

др.; под ред. В.Ф. Балакирева. – Екатеринбург:  
УРО РАН, 2003. – 94 с.

б. Экспериментальный образец импульсного  
генератора нейтронов наносекундной длительности / А.А. Бойко, А.К. Дулатов, Б.Д. Лемешко,  
П.П. Сидоров // Научная сессия МИФИ: сб. науч.  
трудов. – 2005. – Т. 8. – С. 81–82.

7. Пат № 2362277 РФ, МКИ С1, Н 05 Н 1/00.  
Способ генерации нейтронных импульсов /  
Е.П. Боголюбов, А.В. Голиков, А.К. Дулатов и др. –  
Заявл. 14.02.2008; опубл. 20.07.2009.

8. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/1711/html>

**Поступила в редакцию 13.01. 2010 г.**

**Кузнецов Геннадий Федорович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Общая и экспериментальная физика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Область научных интересов – энергогенерирующие устройства. Тел.: 8-(351) 267-93-07.

**Kuznetsov Gennady Fyodorovich** is Dr.Sc. (Engineering), Professor of the General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: energy-generating devices. Tel.: 8-(351) 267-93-07.

**Клещев Дмитрий Георгиевич** – доктор химических наук, профессор кафедры «Общая и экспериментальная физика», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – химия и физика твердого тела. Тел.: 8-(351) 267-93-07, e-mail: dgk@susu.ac.ru.

**Kleshchev Dmitry Georgievich** is Dr.Sc. (Chemistry), Professor of the General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: chemistry of solids, solid state physics. Tel.: 8-(351) 267-93-07, e-mail: dgk@susu.ac.ru.

**Крымский Валерий Вадимович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электротехники, Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – электродинамика конденсированных сред. Тел.: 8-(315) 267-90-14, e-mail: kvv@susu.ac.ru.

**Krymsky Valery Vadimovich** is Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Electrical Engineering Department, South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electrodynamics of the condensed mediums. Tel.: 8-(315) 267-90-14, e-mail: kvv@susu.ac.ru.

**Лаврентьев Сергей Иванович** – мастер электроцеха филиала ОАО «Фортум» филиал Челябинская ТЭЦ-2.

**Lavrentiev Sergey Ivanovich** is a foreman of the electric shop of a branch of JSC “Fortum”, branch of Chelyabinsk heat electric generation plant # 2. Tel.: 8-912-312-0476, e-mail: talavr@bk.ru.

**Гуревич Сергей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая и экспериментальная физика», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – физика магнитных явлений. Тел.: 8-(351) 267-90-38, e-mail: sergur@susu.ac.ru.

**Gurevich Sergey Yurievich** is Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of the General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: physics of magnetic phenomena. Tel.: 8-(351) 267-90-38, e-mail: sergur@susu.ac.ru.

## ВИБРОГАСИТЕЛИ МАЧТ СВЕРХМАЛЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*И.М. Курпичникова, Е.В. Соломин*  
*г. Челябинск, ЮУрГУ*

## TOWERS VIBRATION DAMPERS OF SMALL VERTICAL AXIS WIND TURBINES

*I.M. Kirpichnikova, E.V. Solomin*  
*Chelyabinsk, South Ural State University*

В статье дается описание необходимости установки виброгасителей мачт при размещении ветроэнергетических установок в непосредственной близости к жилому сектору

*Ключевые слова:* возобновляемая энергетика, ветроэнергетические установки, вибрации, виброгасители.

The necessity of mounting of the towers vibration dampers when placing the wind turbines constructions close to a dwelling is given in the article.

*Keywords:* renewable energy, wind turbines, vibrations, vibration dampers.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ), как любая энергетическая или промышленная установка, оказывает вредное влияние на окружающую среду, однако, в отличие от топливных электростанций воздействие от ВЭУ носит локальный характер и может быть уменьшено различными способами, методами и подходами. Из основных негативных последствий работы ветростанций доминирующее значение имеют вибрационные колебания. Они являются причиной разрушения ветроустановок и окружающих предметов, а также близстоящих инженерных сооружений. Определенный спектр вибрационных колебаний может являться причиной возникновения шума, инфразвука или ультразвука, опасных для живых организмов. За счет вибрации могут происходить эрозия почвы, возникать помехи в навигационных приборах, телевизионном и коммуникационном оборудовании [1].

Большинство крупных ветроэнергетических установок полностью автоматизировано, и работает с ведением контроля вибрации. При возрастании вибрации выше нормы, например, при частичном обледенении и последующей разбалансировке ветроколеса (ротора), ВЭУ немедленно останавливается (стопорится). Малые и средние установки, как правило, не оборудованы датчиками вибрации и, к тому же, все чаще устанавливаются рядом с жилыми, офисными и производственными зданиями. Эта тенденция возникает благодаря тому, что пользователями малых и средних установок являются физические лица и небольшие компании, не имеющие возможности приобрести

крупные ВЭУ и стремящиеся сократить установочные и эксплуатационные затраты. Приближение ветроустановок к жилому сектору снижает на 50 % монтажные работы и на 25–50 % затраты на обслуживание в связи с отсутствием выездов и проведения полевых высотных работ, сокращением длины линий электропередач, пути подвоза комплектующих, снижением рисков присутствия ВЭУ на неохранных территориях и т. д. Однако, при размещении ВЭУ вблизи постоянного присутствия человека и/или животных, эти параметры необходимо отслеживать согласно соответствующим СНиП, ГОСТ и другим, применяемым в каждом конкретном случае регламентирующим документам.

Исходя из анализа изученной литературы, можно констатировать, что появление вибрационных колебаний в элементах ветроэнергетической установки, особенно с вертикальной осью вращения, изучено ещё не в полной мере благодаря их ограниченному использованию в связи с тем, что до конца XX века преобладало мнение о низком КПД вертикально-осевых ВЭУ, отсутствии самораскрутки, наличии повышенных вибраций [2]. Отмечены также случаи разрушения агрегатов в результате сильной вибрации, чему способствовало отсутствие научно обоснованных технологий статической и динамической балансировки роторов вертикально-осевых установок.

В 2002–2008 гг. ученые ООО «ГРЦ-Вертикаль» совместно с представителями Лаборатории Беркли (США) провели исследования и опытно-конструкторские работы, результатом ко-

торых явился ряд ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, лишенных большинства вышеперечисленных недостатков.

Такой успех стал возможен за счет применения метода итерационной оптимизации архитектуры и материалов испытываемых ветроустановок, заключающегося в поэтапной корректировке свойств конструкции на основании анализа напряженно-деформированного состояния, собственных частот, основных тонов упругих колебаний, вибрационного фона ВЭУ, с последующим выделением возможных резонансов и их снижением [3]. Тем не менее, очевидно, что вибрационные колебания ветроагрегатов невозможно ликвидировать полностью. Вследствие этого продолжают исследования возможности снижения уровня вибраций различными способами. При этом необходимо различать путь уменьшения вибраций в период проектирования и предпродажной подготовки ветроустановки и путь снижения виброколебаний непосредственно в процессе работы установки (например, при разбалансировке в результате поломки агрегатов, оледенения лопастей и т.д.). В ООО «ГРЦ-Вертикаль» разработан и используется в период предэксплуатационной вибробалансировки способ снижения вибраций за счет подбора материалов компонентов ВЭУ и последующей динамической плоской балансировки ротора ветроэнергетической установки на основе шестилопастной вертикально-осевой ВЭУ-3 мощностью 3 кВт (рис. 1).

Однако в процессе эксплуатации ВЭУ возможна разбалансировка ротора и возникновение вибраций. Регистрация вибраций малых и сверхмалых ветроустановок (до 10 кВт) может быть осуществлена за счет использования датчиков, предлагаемых промышленностью в большом ассортименте. При возникновении вибраций выше

определенного уровня необходимо немедленное вмешательство, особенно в установках, находящихся в непосредственной близости к инженерным сооружениям, а тем более на них, что может вызвать непредсказуемые последствия вплоть до разрушения здания или сооружения.

Одним из вариантов гашения колебаний может служить виброгаситель мачты ветроэнергетической установки, препятствующий распространению вибраций. Целью виброгасителя является гашение вибраций, возникающих при вращении ротора ветроэнергетической установки и передающихся с ротора на мачту, гашение стоячих волн, приходящих от ротора и распространяющихся вдоль мачты, а также самоцентрирование мачты. При жестком (консольном) креплении к фундаменту нижний конец мачты не может гасить колебания, в связи с чем вибрационные колебания через фундамент передаются конструкции сооружения, что негативно сказывается на их прочности и может привести к разрушению, причем как ВЭУ, так и самого сооружения. В некоторых случаях может возникнуть стоячая волна (волны), приводящая к возникновению вертикальных возвратно-поступательных и радиальных вибрационных колебаний и, в конце концов, к последующему разрушению установки.

На рис. 2 представлены варианты виброгасителя. Мачта-труба 7 через упор 1, жестко вмонтированный в ней, передает усилие на демпфирующий элемент в виде пружины 2-1 или резины 2-2, который опирается на подвижный вдоль оси мачты закладной элемент 3, расположенный на шаре 4. Нижняя сферическая поверхность закладного элемента 3 имеет радиус закругления, больший, чем у шара. При возникновении осевых (вертикальных возвратно-поступательных) вибрационных колебаний мачты 8 демпфирующий элемент сглаживает её колебания,

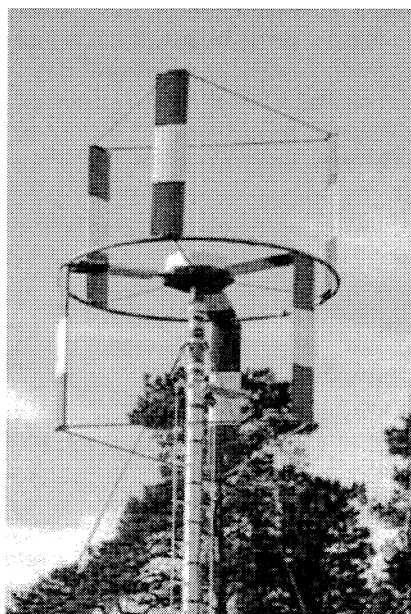
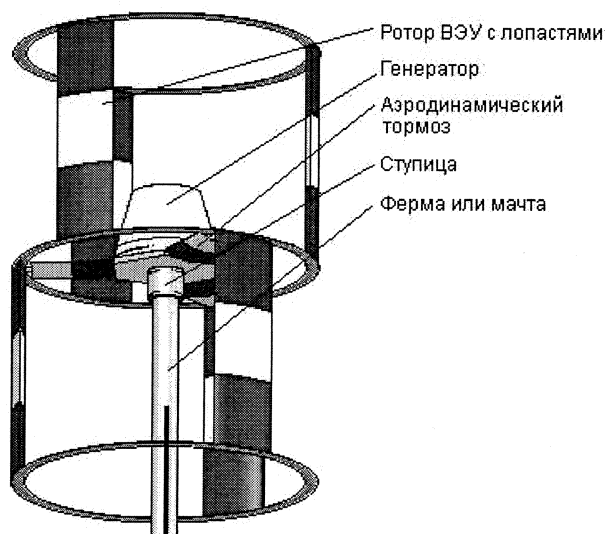


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения

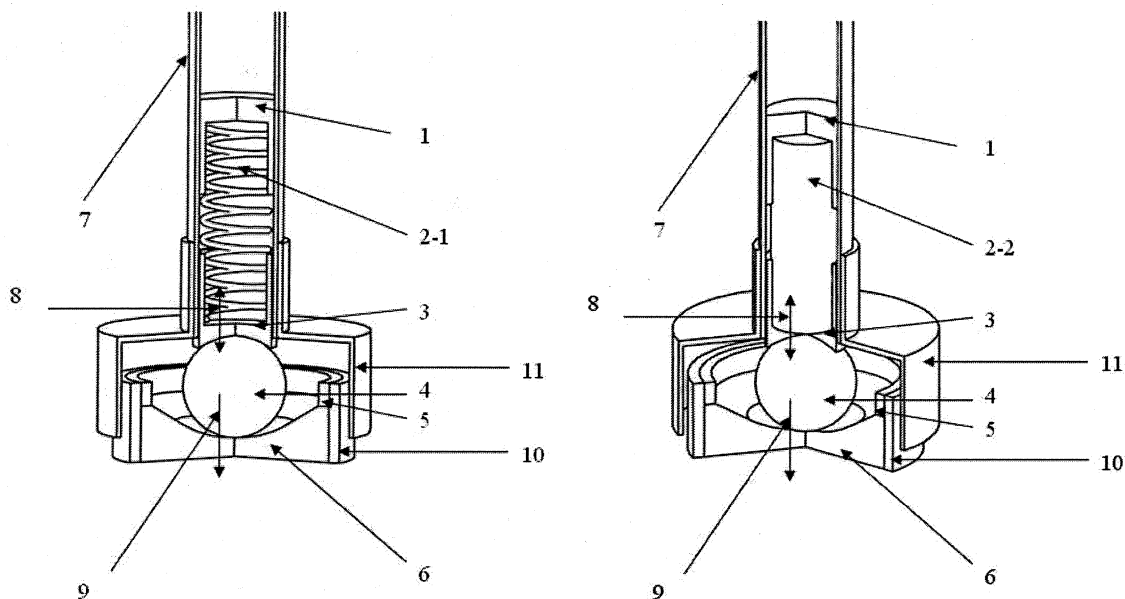


Рис. 2. Варианты виброгасителей

тем самым уменьшая вибрационную нагрузку 9 на чашу 6, направленную вертикально. Вогнутая сферическая верхняя поверхность чаши 6 способствует удержанию шара 4 в центральном положении. При возникновении радиальных (горизонтальных) колебаний шар 4 смещается под их действием, однако всегда стремится возвратиться на место благодаря силе тяжести, действующей на ротор, ступицу и мачту. Ограничитель 11 в совокупности с демпфирующей прокладкой 10, выполненной из эластичного полимерного материала, например резины, ограничивает амплитуду колебаний и частично гасит вибрацию за счет своих естественных демпфирующих свойств. Предельно допустимая амплитуда колебаний исчисляется отдельно для каждого конкретного вида (типа, массы и других параметров) ветряных установок и мачт. Кроме того, дополнительный ограничительный элемент является кожухом для всего виброгасителя и предотвращает попадание пыли, осадков и других инородных тел в виброгаситель.

Гашение колебаний мачты – не единственная проблема, которую необходимо решать при защите базового сооружения от вибраций, генерируемых установленной на нем малой или сверхмалой ветроэнергетической установкой. Вибрации также передаются и на растяжки мачты, которыми в большинстве случаев она оборудована. При этом в каждой растяжке, а, как правило, их не менее трех, возникают вибрации, различные по амплитуде, фазе и частоте, так как во-первых, набегающий на ВЭУ поток имеет различную, меняющуюся во времени возмущающую силу и направление, а во-вторых, нагружение каждой растяжки в каждый момент происходит также по разному. Расчеты и практика показывают, что сила, действующая со стороны мачты на растяжку верхнего яруса, может составлять до 90 000 Н, т. е. пиковые нагрузки на кронштейны крепежа растяжки могут составить до

9 тонн! Именно поэтому для удержания мачты в вертикальном положении нельзя применять жесткие откосы. Применение же эластичных тросов демпфирует только часть колебаний. Таким образом, не все колебательные процессы могут быть предупреждены с помощью одних только тросовых растяжек-демпферов. Необходимы дополнительные виброгасители и/или амортизаторы.

СНиП П-23-81 «Стальные конструкции» говорят о том, что в оттяжках мачт, на проводах и канатах горизонтальных антенных полотен для гашения вибрации следует предусматривать последовательную установку парных низкочастотных (1–2,5 Гц) и высокочастотных (4–40 Гц) виброгасителей рессорного типа. Низкочастотные гасители следует выбирать в зависимости от частоты основного тона оттяжки, провода или каната.

Расстояние  $s$  до места подвески гасителей от концевой заделки каната следует определять по формуле:

$$s \geq \beta d \sqrt{\frac{P}{m}},$$

где  $d$  – диаметр каната, мм;  $m$  – масса 1 м каната, кг;  $P$  – предварительное натяжение в канате, Н;  $\beta$  – коэффициент, равный 0,00041.

Одним из вариантов амортизатора растяжки (оттяжки) может служить устройство, изображенное на рис. 3. Амортизатор представляет собой цилиндрический корпус 7, имеющий отверстие в одном из оснований 12, через которое проходит шток 10, с одного конца которого находится проушина 11. Другой конец штока 10 имеет плоскую круглую пластину 8. Между пластиной 8 и основанием цилиндрического корпуса 12 расположена пружина 9-1 или иной демпфирующий элемент, изготовленный из эластичного полимерного материала, например резины, и являющийся гасителем



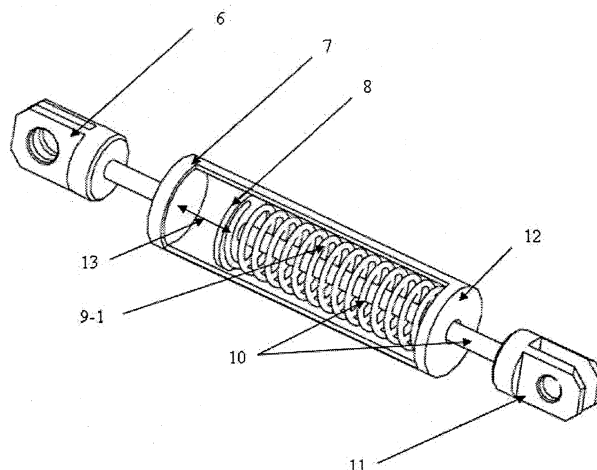


Рис. 3. Виброгаситель растяжки с пружиной

колебаний, возникающих в растяжке. Проушиной 6 амортизатор крепится к растяжке, проушиной 11 к кронштейну мачты.

Функцией устройства является как гашение вибраций, так и пляски растяжек (галопирования), возникающих при вращении ротора ветроэнергетической установки и передающихся с ротора на мачту и далее на растяжку. Галопирование представляет собой вид высокоэнергетического импульса, который имеет циклический характер и вызывает сильную нагрузку в местах крепления растяжки. При расположении фундамента растяжки на инженерном сооружении (здании, мостовой конструкции и т. д.) вибрационные колебания передаются конструкциям сооружения, что негативно сказывается на прочности этих конструкций и может привести к их разрушению. Возникновение стоячих волн, приводящих к появлению продольных вдоль растяжки возвратно-поступательных вибрационных колебаний, может, в конце концов, привести к последующему отрыву растяжки и/или разрушению мачты и/или ротора установки.

Благодаря наличию датчиков вибраций и предложенных конструкций виброгасителя мачты и амортизаторов растяжек пользователь ветроэнергетической установки может своевременно полу-

чать тревожный сигнал о возникновении вибраций опасного уровня, но при этом система на определенное время задержит распространение этих колебаний на базовую конструкцию или сооружение и позволит провести соответствующие работы по устранению или снижению опасных явлений, приводящих к возникновению резонансов сооружения и ВЭУ. Время задержки распространения вибрационных колебаний может вычисляться согласно прогнозируемой функции нарастания колебательного процесса и характеристикам виброгасителей и амортизаторов.

#### Литература

1. Безруких, П.П. *Использование энергии ветра* / П.П. Безруких. – М.: Колос, 2008. – 4 с.
2. Ляхтер, В.М. *Развитие ветроэнергетики* / В.М. Ляхтер // *Малая Энергетика*. – 2006. – № 1–2. – С. 23–38.
3. Соломин, Е.В. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук* / Е.В. Соломин // *Челябинск: Изд-во ЮУрГУ*, 2008. – 9 с.
4. СНиП II-23-81. *Стальные конструкции. Дополнительные требования по проектированию конструкций антенных сооружений связи высотой до 500 м.* (ред. от 12.07.1989). – С. 1–15.

Поступила в редакцию 15.02.2009 г.

**Кирпичникова Ирина Михайловна** – заведующий кафедрой электротехники ЮУрГУ, доктор техн. наук, профессор. Научные интересы – электронно-ионная технология, использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

**Kirpichnikova Irina Mikhailovna** is Head of the Electrical Engineering Department of South Ural State University, Dr.Sc. (Engineering), Professor. Research interests: electron-ionic technology, use of nonconventional renewed energy sources.

**Соломин Евгений Викторович** – генеральный директор ООО «ГРЦ «Вертикаль», кандидат технических наук, в 1990 году окончил Будапештский технический университет, Венгрия, по специальности «Робототехника». Область научных интересов – ветроэнергетика.

**Solomin Eugeny Viktorovich** is CEO of the Limited Liability Company "SRC-Vertical", Cand.Sc. (Engineering). In 1990 Solomin graduated from Budapest Technical University (Hungary), major Robotics. Research interests: wind-power engineering.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ**

1. В редакцию предоставляется печатный вариант статьи и ее электронная версия (документ Microsoft Word), экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати, сведения об авторах (Ф.И.О., место работы, звание и должность, контактная информация (адрес, телефон, e-mail)).

2. Один автор может опубликовать в одном сборнике не более двух статей.

3. Структура статьи: УДК, название, список авторов, аннотация (не более 500 знаков), список ключевых слов, текст работы, литература (ГОСТ 7.1-2003). На отдельной странице приводятся название, аннотация, список ключевых слов и сведения об авторах на английском языке.

4. Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее – 23, нижнее – 23, левое – 22, правое – 25 мм. Шрифт – Times New Roman, кегль – 14. Отступ красной строки 0,7 см, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – полуторный. Рисунки и схемы должны быть сгруппированы и иметь названия.

5. Адрес редакции научного журнала «Вестник ЮУрГУ» серии «Энергетика»: Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, ауд. 256, Энергетический факультет. Ответственный редактор Хохлов Ю.И., тел. (351) 267-90-83, e-mail: Khokhlov@energo.susu.ac.ru; зам. отв. редактора Булатов Б.Г., (351) 267-92-41, e-mail: bbg@susu.ac.ru.

6. Полную версию правил подготовки рукописей и пример оформления можно загрузить с сайта ЮУрГУ (<http://www.susu.ac.ru>), следуя ссылкой: «Научные исследования», «Издательская деятельность», «Вестник ЮУрГУ», «Серии».

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**ВЕСТНИК  
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**№ 14(190) 2010**

**Серия  
«ЭНЕРГЕТИКА»  
Выпуск 13**

Редактор М.Н. Атауллина

Компьютерная верстка В.Г. Харитоновой

**Издательский центр Южно-Уральского государственного университета**

---

Подписано в печать 01.04.2010. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 9,11. Тираж 500 экз. Заказ 96/206.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.