

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№2(27), июнь 2015

Журнал входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционный совет

Председатель редсовета:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук, директор института энергетики и автоматизированных систем МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Зам. председателя редсовета:

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Члены редакционного совета:

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук, г. Варна, Болгария;

В.Д. Дмитриенко – проф. д-р техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина;

Р.А. Сытдыков – проф., д-р техн. наук, Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан;

К.Т. Тергемес – проф., канд. техн. наук, г. Актау, Казахстан.

Dr. Boris Levin – School of Computer Science, The Academic College of Tel-Aviv-Yaffo, Jaffa, Израиль.

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, НМСУ Горный, г. Санкт-Петербург, Россия;

Л.И. Цытович – проф., д-р техн. наук, ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия;

А.М. Зюзев – проф., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Ю.П. Журавлев – канд. техн. наук, гл. энергетик ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Д.В. Чистяков – канд. социол. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС».

Редакционная коллегия

Главный редактор:

А. С. Сарваров – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Члены редакционной коллегии:

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.И. Баранкова – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.С. Логунова – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

С.М. Андреев – доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Б. Агапитов – доц., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Ю.И. Савченко – доц., канд. физ.-мат. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

И.М. Ячиков – доц., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Технические редакторы:

Е.А. Панова – канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Д.А. Савинов – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

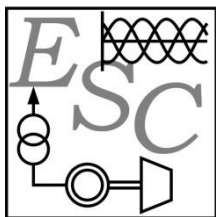
Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВПО «МГТУ»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Журнал отпечатан на полиграфическом участке
МГТУ им. Г.И. Носова.

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 31.06.2015. Заказ ... Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

№2(27) JUN., 2015

Journal is included in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial committee

Head of editorial committee:

Sergey I. Lukianov – Professor, D.Sc. (Eng.), director of Power Engineering and Automated Systems Institute of NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Vice Chairman of editorial committee:

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Members of Editorial committee:

N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc. (Eng.), Varna, Bulgaria;

V.D. Dmitrienko – Professor, D.Sc. (Eng.), NTU «KhPI», Kharkov, Ukraine;

R.A. Sitdikov – Prof., D.Sc. (Eng.), Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;

K.T. Tergemes – Professor, Ph.D. (Eng.), Aktau, Kazakhstan.

Dr. Boris Levin – School of Computer Science, The Academic College of Tel-Aviv-Yaffo, Jaffa, Israel.

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Eng.), NRU «MPEI», Moscow, Russia;

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Eng.), NMRU (University of Mines), Saint-Petersburg, Russia;

L.I. Tsitovitch – Professor, D.Sc. (Eng.), «SUSU» (NRU), Chelyabinsk, Russia;

A.M. Ziyzev – Professor, D.Sc. (Eng.), UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

I.P. Zhuralev – Ph.D.(Eng.), chief power engineer «MMK» JSC, Magnitogorsk, Russia.

D.V. Chistyakov – Ph.D.(Sociology), chief executive «KonsOM SKS» JSC.

Editorial board

Editor-in-chief:

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editorial board members:

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.I. Barankova – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor, Ph.D.(Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.B. Agapitov – Associate Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

Yu.I. Savchenko – Associate Professor, Ph.D. in Physics and Mathematics, NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive editor:

I.M. Yachikov – Associate Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Typographers:

E.A. Panova – Ph.D.(Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

D.A. Savinov – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HPE NMSTU, 2015

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol.1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014 .

The publisher:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.

Publication date: 31.06.2015. Order. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и практика автоматизированного электропривода.....	4
<i>Бычков М.Г., Кузнецова В.Н.</i> Оптимальное и квазиоптимальное управление позиционным электроприводом по критерию минимума электрических потерь	4
<i>Крюков О.В.</i> Анализ структур преобразователей частоты для технологически связанных электроприводных газоперекачивающих агрегатов	11
<i>Цытович Л.И., Дудкин М.М., Рахматулин Р.М., Брылина О.Г., Тюгаев А.В.</i> Помехоустойчивая синхронизация вентильных преобразователей	14
<i>Храмшин В.Р., Одинцов К.Э., Шурыгина Г.В., Петухова О.И., Шохина Г.В., Косматов А.К.</i> Анализ технико-экономической эффективности внедрения энергосберегающих тиристорных электроприводов прокатных станов.....	20
Электроэнергетика.....	29
<i>Усманов Р.Р., Петров Д.С.</i> Фазировка объектов энергетики дифференциальными защитами линий с передачей данных по волоконно-оптическим линиям связи	29
<i>Белый А.В., Маклаков А.С., Радионов А.А.</i> Новый метод компенсации реактивной мощности посредством активных выпрямителей для промышленных умных сетей.....	31
Энерго- и ресурсосбережение	37
<i>Панов А.Н., Чистяков Д.В., Коробейников С.М., Гузей К.Е.</i> Применение стационарной системы вибродиагностики главного редуктора привода бесконусного загрузочного устройства доменной печи	37
Электротехнологии в промышленности.....	39
<i>Ячиков И.М., Ларина Т.П.</i> Экспериментальное исследование положения тела во взвешенном состоянии в цилиндрическом высокочастотном индукторе с обратным витком	39
Промышленная электроника, автоматика и системы управления	44
<i>Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И.</i> Система визуализации при создании адаптивного комплекса локального уровня управления в АСУ ТП промышленного производства	44
<i>Масленникова О.Е., Назарова О.Б.</i> Типовой проект внедрения корпоративной информационной системы для строительных организаций	47
<i>Парсункин Б.Н., Обухов Г.Ф., Обухова Т.Г., Ахметова А.У.</i> Математическая модель оперативного стабилизирующего контура для цифрового централизованного автоматического управления технологическими параметрами.....	53
Теория и методика профессионального образования	57
<i>Курзаева Л.В.</i> К вопросу о формировании системы оценки результатов обучения личности в рамках формального, неформального и внеформального обучения	57
Сведения об авторах	62

CONTENT

heory and practise of automated electric drive	4
<i>Bichkov M.G., Kuznetsova V.N.</i> Optimum and quasioptimum control of the positional electric drive by a criterion of a minimum of electric losses.....	4
<i>Krjukov O.V.</i> Analysis of existing methods for diagnostics of electric motors and perspectives of their development	11
<i>Tsytovich L.I., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M., Brylina O.G., Tygaev A.V.</i> The noise immunity synchronization of the valve converters	14
<i>Khramshin V.R., Odintsov K.E., Shurygina G.V., Petuhova O.I., Shohina G.V., Kosmatov A.K.</i> Analysis of technical and economic efficiency of implementation the energy-efficient thyristor electric drives of rolling mills.....	20
Power engineering.....	29
<i>Usmanov R.R., Petrov D.S.</i> Phasing of energetics objects by the differential protection of the lines with data communications using fiber-optic communication links	29
<i>Belyj A.V., Maklakov A.S., Radionov A.A.</i> New reactive power compensation method by active rectifiers for industrial smart grid.....	31
Energy- and resources-economy	37
<i>Panov A.N., Chistjakov D.V., Korobejnikov S.M., Guzej K.E.</i> Applying the stationary system of vibration diagnostics of main gear box of blast furnace bell-less top drive.....	37
Industrial electrotechnics	39
<i>Yachikov I.M., Larina T.P.</i> Experimental research of body position in suspension state in a cylindrical high-frequency inductor with a reverse coil	39
Power electronics, automation and control systems....	44
<i>Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I.</i> Visualization system for creating an adaptive complex of a local level control in APCS of industrial production.....	44
<i>Maslennikova O.Ye, Nazarova O.B.</i> Generic project of implementation the corporate information system for building organizations	47
<i>Parsunkin B.N., Obukhov G.F., Obukhova T. G., Ahmetova A.U.</i> a mathematical model of active stabilizer circuit for digital centralized automatic control technological parameters.....	53
Theory and methods of professional education	57
<i>Kurzaeva L.V.</i> About formation the results evaluation system of person learning within the context of formal, informal and non-formal learning.....	57
Information about the authors.....	62

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.3

Бычков М.Г., Кузнецова В.Н.

ОПТИМАЛЬНОЕ И КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

На примере двигателя постоянного тока с независимым возбуждением рассмотрена оптимизация тахограмм позиционного электропривода по критерию минимума электрических потерь в якорной цепи при обработке скачков заданных перемещений с номинальным магнитным потоком. Проведен сравнительный анализ треугольных, параболических и квазиоптимальных трапецидальных тахограмм. Определены параметры режимов «минимум миниморум» и зоны рационального изменения ускорения для варьирования времени обработки перемещений.

С применением обобщенного критерия электромеханического преобразования энергии исследована энергетика позиционного электропривода при близком к нулю моменте сопротивления движению.

Ключевые слова: позиционный электропривод, оптимальные тахограммы, квазиоптимальное управление, обобщенный критерий электромеханического преобразования.

ВВЕДЕНИЕ

Толкования термина «оптимум» и связанного с ним понятия «оптимального управления» достаточно разнообразны и зависят от сферы их применения. Можно найти определения демографического оптимума социума, биологического оптимума экосистемы, температурного оптимума для различных животных, технологического оптимума организации производства и множество других. Согласно [1] оптимум это: 1) совокупность наиболее благоприятных условий для чего-либо; 2) наилучший вариант решения какого-либо вопроса, кратчайший путь к достижению цели; 3) предельно высокая рациональность.

В электроприводе, как в технической системе, под оптимальным управлением обычно понимают выбор таких управляющих параметров, которые обеспечивали бы наилучшее с точки зрения заданного критерия протекание процесса электромеханического преобразования энергии, или, иначе, наилучшее поведение системы, ее движение к цели по оптимальной траектории [2]. Эти управляющие параметры обычно рассматриваются как функции времени, что означает возможность их изменения по ходу процесса для выбора на каждом этапе их наилучших (оптимальных) значений. Это не исключает, однако, рассмотрения экономических аспектов и оптимизации энергетических показателей электропривода на всех этапах его жизненного цикла от разработки до утилизации.

Создание в середине 50-х годов прошлого столетия математической теории оптимального управления было связано с потребностями решения технических и экономических задач. В настоящее время оптимальное управление выросло в обширную самостоятельную теорию, использующую в своих исследованиях аппарат высшей алгебры, математического и функционального анализа, дифференциальных уравнений. Рассматривается оптимальное управление детерминированными объектами, системами с распределёнными параметрами, стохастическими системами. Наиболее широко применяются методы вариационного исчисления, принципа максимума Понтрягина и динамического программирования Беллмана [3 – 6]. Дальнейшее развитие теории оптимального управления связано с адаптивными и обучающимися системами, алгоритма-

ми управления с нечёткой логикой, искусственными нейронными сетями [7 – 10].

Реальное поведение объекта или системы всегда отличается от задаваемого управляющими воздействиями (формируемыми оператором или программно) вследствие неточности в начальных условиях, неполной информации о внешних возмущениях, действующих на объект, неточности реализации программного управления и т.д. Поэтому для минимизации отклонения поведения объекта от оптимального обычно используется система автоматического регулирования.

На начальном этапе развития систем оптимального управления их практическая реализация сдерживалась возможностями аппаратных средств систем управления. Стремительное развитие компьютерных устройств и технические возможности современных микропроцессорных средств управления в настоящее время позволяют реализовывать в реальном времени алгоритмы управления практически любой сложности. Однако обоснованию необходимой точности поддержания экстремального значения критерия оптимальности, сравнительным оценкам эффективности различных вариантов управления в научно-технической литературе уделено существенно меньше внимания, чем реализации собственно оптимальных систем. Построение систем так называемого «квазиоптимального» управления основано на том, что если критерий оптимальности имеет «пологий» минимум или максимум (значения в районе экстремума мало отличаются при достаточно больших отклонениях координат), то нет необходимости точной реализации оптимального алгоритма. Как правило, более простой «квазиоптимальный» регулятор обеспечивает поддержание системы в районе экстремума без существенных отклонений регулируемых переменных и показателей качества от идеала.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

При построении систем автоматического регулирования электроприводов наиболее часто в качестве критерия оптимальности выбирают быстродействие при заданной точности поддержания регулируемых координат. На **рис. 1** показана структурная схема трёхконтурной системы подчинённого регулирования ко-

ординат электропривода, оптимизированной по критерию максимального быстродействия при обработке малых перемещений.

Для позиционных электроприводов, имеющих регулятор с обратной связью по положению (углу поворота ротора φ), типовым управляющим воздействием является скачок задания на перемещение. В зависимости от его значения различают режимы обработки больших, средних и малых перемещений (рис. 2).

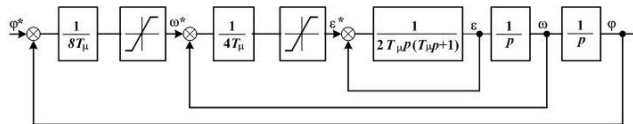


Рис. 1. Оптимальная по быстродействию трёхконтурная система подчиненного регулирования с ограничением заданий скорости ω и ускорения ε

При обработке малых перемещений не достигается ни одно из ограничений на координаты электропривода. Для средних перемещений вступают в действие ограничение по ускорению (моменту или току) и рывку (темпу изменения тока или момента), но максимум скорости уровня ограничения не достигает. Для больших перемещений после разгона какое-то время двигатель работает на максимальной скорости.

В системах, построенных по принципу подчинённого регулирования, регулятор положения для средних и больших перемещений фактически вступает в действие только на завершающей стадии переходного процесса, а длительность обработки определяется главным образом уставками ограничений ускорения и скорости. Такие же тахограммы могут быть отработаны без ограничения регулятора положения, если вместо скачка на его вход подать формируемое генератором траектории текущее задание на положение с учётом всех требуемых ограничений. Оптимизация по быстродействию различных структур и контуров регулирования детально рассмотрена в большом числе публикаций, например в [7, 11, 12].



Рис. 2. Графики $\omega(t)$ отработки скачка задания для больших, средних и малых перемещений

Обратим внимание на то, что фиксированная настройка пропорционального регулятора положения на оптимальный характер переходного процесса для малых перемещений не обеспечивает его сохранения для средних и больших перемещений (рис. 2). В координатах $(\omega, \Delta\varphi)$ участки движения с токоограничением, обеспечивающие максимальное быстродействие, представляются в виде отрезков параболы (рис. 3). Перере-

гулирование возникает из-за того, что участок торможения с токоограничением начинается слишком поздно. Как показано в [11], точное позиционирование без перерегулирования обеспечивается для любых скачков задания «параболическим» регулятором положения с переменным значением коэффициента передачи.

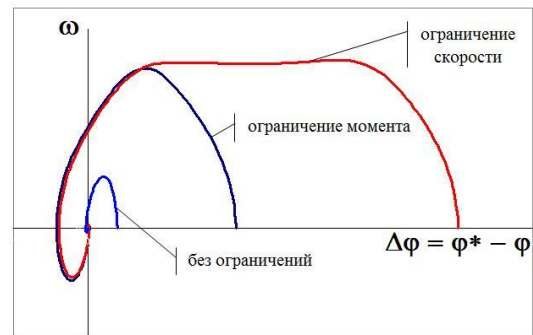


Рис. 3. Фазовые портреты $\omega(\Delta\varphi)$ отработки скачка задания для больших, средних и малых перемещений

Интенсификация производственных процессов, как правило, увеличивает потери в электроприводе, что вызывает увеличение нагрева электрической машины. При этом рано или поздно вступает в действие специфическое ограничение по нагреву. Оно вызвано достижением температурой наиболее нагретых частей электродвигателя (как правило, изоляции обмоток) допустимого значения. Избежать этого в электроприводах повторно-кратковременного режима работы можно двумя путями: установкой более мощного двигателя или формированием оптимальных переходных процессов по критерию минимума потерь. Ограничение по нагреву определяется балансом мощности выделяемых и отводимых тепловых потерь, но не действует мгновенно, поскольку все элементы конструкции способны не только передавать, но и накапливать тепловую энергию. Другими словами, это ограничение не строгое и для длительного и повторно-кратковременного режимов работы заменяется ограничением средних тепловых потерь, выделяемых за цикл работы или изменения нагрузки.

Увеличение установленной мощности электродвигателя для обеспечения допустимой тепловой нагрузки не всегда рационально, поскольку при существенной доле динамических процессов изменения скорости в цикле работы приводит к увеличению суммарного момента инерции, динамических моментов и, следовательно, дополнительному увеличению требуемой мощности двигателя.

Формирование переходных процессов, оптимальных по критерию минимума потерь энергии, как бы выравнивает нагрузочную диаграмму. Аналогичная задача при сильной неравномерности нагрузки решается параметрическим путем за счет применения маховиков. Цель формирования оптимальных процессов определяется конкретной проектной ситуацией. Как уже упоминалось, наиболее часто главным критерием является максимальная производительность механизма. В этом случае оптимальная тахограмма позволяет ограничивать нагрев двигателя на допустимом уровне. Однако минимизация потерь в электроприводе может быть и самостоятельной задачей.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Рассмотрим задачу оптимального управления на примере управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения по критерию минимума электрических потерь в якорной цепи. Для упрощения анализа будем считать, что якорная цепь двигателя питается от безынерционного преобразователя. Электромагнитные переходные процессы в якорной цепи двигателя и тепловые переходные процессы не учитываются.

Все уравнения будем записывать в относительных единицах, приняв за базовые номинальные значения скорости, тока якоря, магнитного потока и момента. Таким образом, уравнения, описывающие систему электропривода, имеют вид:

$$\frac{dv}{d\tau} = \varepsilon; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = v; \quad \frac{dq}{d\tau} = i^2; \quad \varepsilon = \phi i - \mu_c; \quad (1)$$

$$\phi v \leq 1,$$

где i , ε , v , ϕ , θ , μ_c , q , τ — относительные значения тока, ускорения, скорости, магнитного потока, угла поворота вала двигателя, момента статического сопротивления, количества тепла (электрических потерь), выделяемого в якорной цепи, и времени. Базовые величины для времени $T_6 = J\omega_n/M_n$; перемещения $\theta_6 = \omega_n T_6$; электрических потерь $Q_6 = I_n^2 R_n T_6$, где J — суммарный момент инерции; R_n — суммарное активное сопротивление якорной цепи в нагретом состоянии.

В общем случае задача оптимального управления сводится к отысканию таких управляющих воздействий, которые переводят систему из известного начального в заданное конечное состояние, минимизируя при этом некоторый функционал. В рассматриваемом случае управляющим воздействием для двигателя является ток якорной цепи i , а функционал имеет вид

$$q = \int_{\tau_0}^{\tau_k} i^2 d\tau. \quad (2)$$

Необходимость управления магнитным потоком определяется заданным значением скорости: при $\omega < \omega_n$ ($v < 1$) $\phi = 1$, а при $\omega > \omega_n$ — $\phi = 1/v$. Соответственно можно выделить две зоны формирования оптимальных процессов — при постоянном потоке (до номинальной скорости) и при ослабленном потоке. Вид оптимальных управляющих воздействий, а следовательно, и вид тахограмм может быть найден, например, с помощью принципа максимума Понтрягина [4].

Следует особо отметить важность точной формулировки задачи оптимального управления, начального и конечного состояний системы. Ограничимся рассмотрением случаев с $0 < v < 1$ и $\mu_c \geq 0$. Так, если ставится задача отработки заданного перемещения θ^* без ослабления потока ($\phi = 1$), абсолютный минимум $q_{\min}$ (минимум миниморум) электрических потерь в якорной цепи имеем при неизменной скорости $v = 1$, поскольку при этом $i = \mu_c$, а время отработки $\tau = \tau_k - \tau_0 = \theta^*/v$ минимально. Снижение начальной скорости $v_{\text{нач}}$ не целесообразно, поскольку приводит к

появлению участка разгона, на котором $i > \mu_c$ (что увеличивает q), кроме того увеличивается и τ . Снижение конечной скорости $v_{\text{кон}}$ вплоть до нулевого значения было бы целесообразно, поскольку можно было бы формировать участок торможения с $\varepsilon = -\mu_c$, на котором $i = 0$ (что уменьшает q), но при этом увеличивается τ . Кроме того, $v_{\text{кон}} < 1$ целесообразно только при однократном действии, а повторение цикла приведёт к появлению участка разгона и увеличению общецикловых электрических потерь.

Как уже упоминалось, при отработке больших перемещений в тахограмме выделяются участки разгона, движения на максимальной скорости и торможения (см. рис. 3). Если для участков разгона и торможения ставится задача перейти от некоторой начальной скорости $v_{\text{нач}}$ к конечной $v_{\text{кон}}$ и не оговаривается значение углового перемещения θ (режим так называемых «разгонных» электроприводов), то решением являются так называемые линейные тахограммы (состоящие из отрезков прямых с разными значениями $\varepsilon_{\text{лин}}$), широко применяемые на практике. Для этого случая

$$q = \Delta p_{\text{эл}} \tau = (\varepsilon_{\text{лин}} + \mu_c)^2 \cdot (v_{\text{кон}} - v_{\text{нач}}) / \varepsilon_{\text{лин}}. \quad (3)$$

а условие минимум миниморум находится из уравнения $\partial q / \partial \varepsilon_{\text{лин}} = 0$. Дифференцируя (3), после преобразований имеем

$$\partial q / \partial \varepsilon_{\text{лин}} = (v_{\text{кон}} - v_{\text{нач}}) \cdot (\varepsilon_{\text{лин}}^2 - \mu_c^2) / \varepsilon_{\text{лин}}^2. \quad (4)$$

откуда следует $\varepsilon_{\text{лин}} = \pm \mu_c$ (знак «+» относится к режиму разгона, а «-» к режиму торможения). Минимум q на участке торможения с $\varepsilon_{\text{лин}} = -\mu_c$ не вызывает сомнений, поскольку при этом условии $i = 0$ и согласно (2) $q = 0$. Физический смысл минимума q на участке разгона с $\varepsilon_{\text{лин}} = +\mu_c$ требует пояснений. Экстремальное значение q при варьировании ε получается из-за того, что в (3) увеличение ε сокращает время τ , но одновременно увеличивает мощность потерь $\Delta p_{\text{эл}}$. При $\varepsilon_{\text{лин}} \rightarrow \infty$ значение $\tau \equiv 1/\varepsilon_{\text{лин}}$, но $\Delta p_{\text{эл}} \equiv \varepsilon_{\text{лин}}^2$, и в результате q стремится к бесконечности. При $\varepsilon_{\text{лин}} \rightarrow 0$ значение $\Delta p_{\text{эл}} = (\varepsilon_{\text{лин}} + \mu_c)^2$ минимально, но $\tau = (v_{\text{кон}} - v_{\text{нач}}) / \varepsilon_{\text{лин}}$ и q также стремятся к бесконечности. Поскольку (4) представляется в виде

$$\partial q / \partial \varepsilon_{\text{лин}} = \frac{\partial \Delta p_{\text{эл}}}{\partial \varepsilon_{\text{лин}}} \cdot \tau + \Delta p_{\text{эл}} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon_{\text{лин}}}. \quad (5)$$

можно показать, что при $\varepsilon_{\text{лин}} = +\mu_c$ слагаемые в (5) равны по величине и противоположны по знаку, что и даёт необходимое условие экстремума.

Если же в условии задачи дополнительно указывается заданное перемещение θ^* , то оптимальные тахограммы имеют более сложный вид. При номинальном магнитном потоке и $\mu_c = \text{const}$ оптимальное управление обеспечивается при изменении тока по линейному закону от времени

$$i = \mu_c + \varepsilon_{\text{нач}} - \frac{C}{2} \tau, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{нач}}$ – начальное значение ускорения; C – константа, определяющая темп изменения ускорения.

При линейном изменении тока скорость изменяется по параболическому закону

$$v = v_{\text{нач}} + \varepsilon_{\text{нач}} \tau - \frac{C}{4} \tau^2. \quad (7)$$

Выражения для θ и q имеют вид

$$\theta = v_{\text{нач}} \tau + \frac{\varepsilon_{\text{нач}}}{2} \tau^2 - \frac{C}{12} \tau^3; \quad (8)$$

$$q = (\mu_c + \varepsilon_{\text{нач}})^2 \tau - \frac{C}{2} (\mu_c + \varepsilon_{\text{нач}}) \tau^2 + \frac{C^2}{12} \tau^3. \quad (9)$$

Решая совместно (6), (7) с учетом того, что $\varepsilon = i - \mu_c$, имеем

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\varepsilon_{\text{нач}}^2 - C(v - v_{\text{нач}})}. \quad (10)$$

Знак плюс или минус выбирается в зависимости от того, на каком участке тахограммы – разгона или торможения работает привод. На **рис. 4** приведены семейства тахограмм при $v_{\text{нач}} = 0,25$ для двух значений $\varepsilon_{\text{нач}}$ и варьировании C . Для $\varepsilon_{\text{нач}} = 1,5$, $C = 3$ дополнительно приведена тахограмма с $v_{\text{нач}} = 0$ и эквивалентная ей по заданному перемещению $\theta^* = 1$ и времени отработки $\tau^* = 2$ треугольная тахограмма с $\varepsilon_{\text{лин}} = 1$ и максимумом $v_m = 1$ (штриховая линия). Следует заметить, что для отработки одного и того же перемещения за одно и то же время по параболической тахограмме требуется увеличение $\varepsilon_{\text{нач}}$ на 50% по сравнению с $\varepsilon_{\text{лин}}$, но значение максимума v_m будет на 25% меньше, чем для треугольной тахограммы.

Увеличение $v_{\text{нач}}$ при неизменных значениях $\varepsilon_{\text{нач}}$ и C не изменяет форму параболического участка, но обеспечивает отработку за то же время большего перемещения, т.е. более эффективно по критерию минимума электрических потерь. Параболическая форма тахограмм строго оптимальна, пока $v_m < 1$. Формальное построение тахограммы по (7) при $v_{\text{нач}} = 0,25$, $\varepsilon_{\text{нач}} = 1,5$, $C = 2$ даёт параболу с $v_m = 1,375$, но её формирование невозможно без увеличения напряжения выше номинального или без ослабления потока на участке $v(\tau) > 1$. В последнем случае она, строго говоря, не является оптимальной и может быть отнесена к классу квазиоптимального управления. Оценка целесообразности её использования требует сравнения с истинными оптимальными тахограммами при ослаблении магнитного потока. Формирование оптимальных по минимуму электрических потерь тахограмм при $v(\tau) > 1$ является самостоятельной задачей и выходит за рамки данной статьи. Основы оптимального управления при ослаблении магнитного потока рассмотрены в [14, 15].

Как показано в [15], оптимальное управление по (6) совершенно одинаково для следующих трех формулировок задачи:

1. При заданных времени отработки τ^* и угловом перемещении θ^* обеспечить минимально возможные электрические потери q .

2. При заданных τ^* и q^* обеспечить максимально возможное перемещение θ .

3. При заданных θ^* и q^* обеспечить максимальное быстроедействие (минимально возможное τ).

В силу сказанного далее будем рассматривать только отработку заданного перемещения за заданное время. Заметим также, что любой участок из приведенных на **рис. 4** тахограмм является оптимальным по критерию минимума электрических потерь при отработке перемещения с соответствующими начальными и конечными условиями.

На практике значения начальной $v_{\text{нач}}$ и конечной $v_{\text{кон}}$ скоростей задаются технологией работы установки, приводимой в движение электроприводом. Отработка θ^* за τ^* обеспечивается согласованным выбором значений $\varepsilon_{\text{нач}}$ и C , которые получаются подстановкой θ^* , τ^* , $v_{\text{нач}}$, $v_{\text{кон}}$ в (7) и (8):

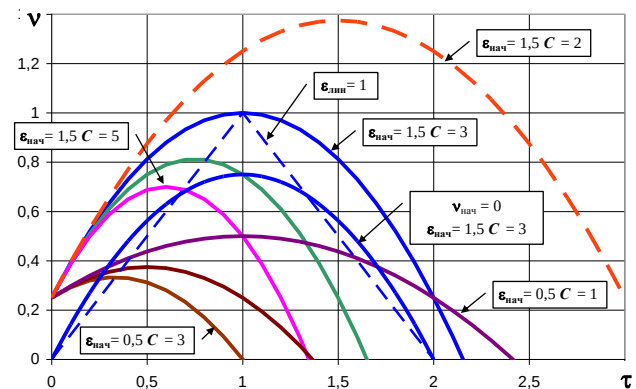


Рис. 4. Варьирование параметров параболических тахограмм

$$C = 12 \cdot (2v_{\text{ср}} - v_{\text{нач}} - v_{\text{кон}}) / \tau^{*2}; \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{нач}} = (6v_{\text{ср}} - 4v_{\text{нач}} - 2v_{\text{кон}}) / \tau^*. \quad (12)$$

где $v_{\text{ср}} = \theta^* / \tau^*$ – заданная средняя скорость отработки заданного перемещения.

Поскольку рассматривается случай $\mu_c = \text{const}$, его значение при $\phi = 1$ ($v < 1$) не влияет на форму тахограммы. Но если освободить значение τ^* , то, как и для линейных тахограмм, можно искать минимально возможное значение q при отработке θ^* из условия $\partial q(\varepsilon_{\text{нач}}, \mu_c) / \partial \varepsilon_{\text{нач}} = 0$. При этом изменением C обеспечивается условие $\theta^* = \text{const}$.

Ограничимся детальным рассмотрением частного случая $v_{\text{кон}} = v_{\text{нач}} = 0$, соответствующего режиму перемещения приводимого в действие элемента технологической установки с последующей остановкой в заданном положении. В этом случае

$$\varepsilon_{\text{нач}} = 6 \cdot \theta^* / \tau^{*2}, \quad C = 24 \cdot \theta^* / \tau^{*3} \quad (13)$$

при выполнении условия $v_{\text{max}} \leq 1$.

На **рис. 5** показаны линейные и параболические тахограммы при отработке одного и того же перемещения $\theta^* = 1$ при $\mu_c = 1$ для разных τ^* . При $\tau^* = 2$ для треугольного графика с $\varepsilon_{\text{тр}} = 1$ согласно (3) выделяемые за цикл потери электрической энергии равны

$$q_{\text{тр}} = q_{\text{разг}} + q_{\text{торм}} = (\mu_c + \varepsilon_{\text{тр}})^2 \tau^* / 2 + (\mu_c - \varepsilon_{\text{тр}})^2 \tau^* / 2 = (1+1)^2 \cdot 1 / 2 + 0 = 4. \quad (14)$$

За это же время при параболической тахограмме с $\varepsilon_{\text{нач}} = 1,5$ согласно (9) выделяются потери $q_{\text{пар}} = 3,5$, т.е. они уменьшаются на 12,5%.

Дифференцируя (14) по $\varepsilon_{\text{тр}}$, из условия $\partial q_{\text{тр}}(\varepsilon_{\text{тр}}, \mu_c)/\partial \varepsilon_{\text{тр}} = 0$ имеем значение $\varepsilon_{\text{тр}} = \mu_c/\sqrt{3}$, обеспечивающее абсолютный минимум потерь при треугольной тахограмме. В этом случае для отработки $\theta^* = 1$ требуется $\tau^* = 2,65$. При этом $q_{\text{тр}} = 3,51$, что практически совпадает с $q_{\text{пар}}$ при $\varepsilon_{\text{нач}} = 1,5$ и $\tau^* = 2$.

Дифференцируя (9) по $\varepsilon_{\text{нач}}$, с учетом (13) из условия $\partial q(\varepsilon_{\text{нач}}, \mu_c)/\partial \varepsilon_{\text{нач}} = 0$ имеем значение $\varepsilon_{\text{нач}} = \mu_c$, обеспечивающее абсолютный минимум потерь при параболической тахограмме. При этом для отработки $\theta^* = 1$ требуется $\tau^* = 2,45$ и выделяются потери $q_{\text{пар}} = 3,266$. Таким образом, для режима минимум минимум применение параболических тахограмм по сравнению с треугольными сокращает как время отработки, так и выделяемые электрические потери. Однако эти различия не превышают 7%.

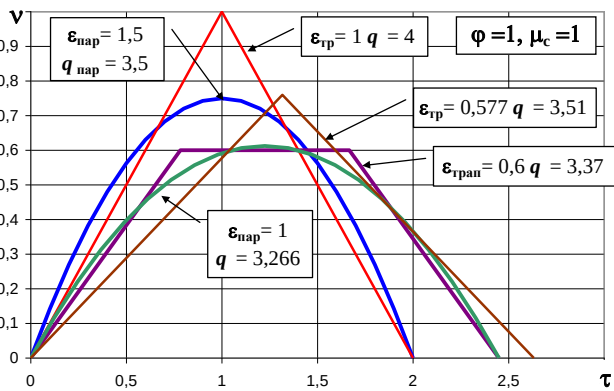


Рис. 5. Сравнение треугольных, параболических и трапецидальной тахограмм

Сократить одновременно и τ^* и q по сравнению с треугольной тахограммой можно, формируя квазиоптимальную трапецидальную тахограмму, например, обеспечивающую отработку θ^* при $\tau_{\text{трап}}^* = \tau_{\text{пар}}^*$ и $v_{\text{макс трап}} = v_{\text{макс пар}}$ за счёт варьирования $\varepsilon_{\text{трап}}$. На рис. 5 этому случаю соответствует трапеция с $\varepsilon_{\text{трап}} = 0,6$, $v_{\text{макс трап}} = 0,6$ и $q_{\text{трап}} = 3,37$, что всего на 3% больше, чем минимум минимум для параболы $q_{\text{пар}} = 3,266$.

Получив значения параметров для режимов минимум минимум оптимальной и квазиоптимальных тахограмм при $v_{\text{нач}} = v_{\text{кон}} = 0$, перейдём к оценке эффективности повышения производительности (уменьшения τ^*) за счёт роста ε и соответствующего увеличения электрических потерь. Ограничимся рассмотрением трапецидальных тахограмм при $\theta^* = 1$ и $\varepsilon_{\text{лин}} > 1$. Следует заметить, что увеличение θ^* при $\varepsilon_{\text{лин}} = \text{const}$ не влияет на участки разгона и торможения, а приводит к появлению участка движения с установившейся скоростью, протяженность которого

$$\theta_{\text{уст}} = \theta^* - \theta_{\text{разг}} - \theta_{\text{торм}} \quad (15)$$

и длительность

$$\tau_{\text{уст}} = \theta_{\text{уст}}/v_{\text{макс}}, \quad (16)$$

где $\theta_{\text{разг}} = \theta_{\text{торм}} = v_{\text{макс}}^2/(2\varepsilon_{\text{лин}})$.

Увеличение $\varepsilon_{\text{лин}}$ при $\theta^* = \text{const}$ также приводит к

появлению участка $\theta_{\text{уст}}$. На рис. 6 приведены зависимости суммарных электрических потерь $q_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$ и их составляющих $q_{\text{разг}}$, $q_{\text{уст}}$ и $q_{\text{торм}}$, а также суммарного времени $\tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$ и произведения $(q \cdot \tau)_{\text{трап}}$ при отработке $\theta^* = 1$ и $\mu_c = 1$. С ростом $\varepsilon_{\text{лин}}$ значение $\tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$ монотонно уменьшается, приближаясь к предельному значению $\tau_{\text{мин}} = \theta^*/v_{\text{макс}} = 1$. При этом $q_{\text{уст}}$ растёт от нуля до предельного значения $\mu_c^2 \cdot \tau_{\text{мин}} = 1$, а $q_{\text{разг}}$ и $q_{\text{торм}}$ нарастают практически линейно с наклоном $\partial q/\partial \varepsilon = v_{\text{макс}} = 1$. Сопоставляя графики $q_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$ и $\tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$, следует отметить, что эффективность интенсификации отработки заданного перемещения, характеризуемая критерием отношения уменьшения времени отработки $\Delta\tau_{\text{трап}}$ к увеличению выделяемых электрических потерь $\Delta q_{\text{трап}}$

$$\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}} = [\tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}1}) - \tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}2})]/[q_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}2}) - q_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}1})], \quad (17)$$

уменьшается с ростом $\varepsilon_{\text{лин}}$.

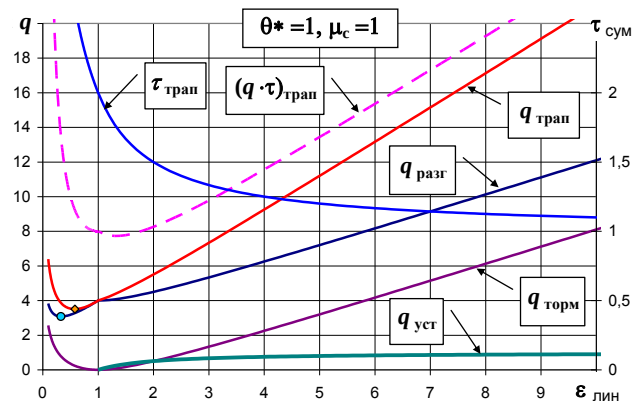


Рис. 6. Изменение электрических потерь и времени отработки для $\theta^* = 1$, $\mu_c = 1$ при варьировании $\varepsilon_{\text{лин}}$

Для оценки области рационального увеличения $\varepsilon_{\text{лин}}$ удобно воспользоваться графиком произведения $(q \cdot \tau)_{\text{трап}}$. В диапазоне $1 < \varepsilon_{\text{лин}} < 2$ его значение остаётся практически неизменным, и увеличение потерь на 38% ($\Delta q_{\text{трап}} = 5,5 - 4 = 1,5$) можно считать рациональным, поскольку оно сопровождается уменьшением времени на 25% ($\Delta\tau_{\text{трап}} = 2 - 1,5 = 0,5$). В диапазоне $2 < \varepsilon_{\text{лин}} < 4$ произведение $(q \cdot \tau)_{\text{трап}}$ возрастает на 50%, поскольку увеличение потерь на 68% ($\Delta q_{\text{трап}} = 9,25 - 5,5 = 3,75$) вызывает уменьшение времени всего на 17% ($\Delta\tau_{\text{трап}} = 1,5 - 1,25 = 0,25$). Строгой границы увеличения $\varepsilon_{\text{лин}}$ не существует, но $\varepsilon_{\text{лин}} > 4$ явно нерационально, поскольку по отношению к исходному треугольному графику с $\varepsilon_{\text{лин}} = 1$, $\tau_{\text{тр}} = 2$ и $q_{\text{тр}} = 4$ при увеличении $\varepsilon_{\text{лин}}$ до 4 уже достигнуто 75% от максимально возможного уменьшения $\tau_{\text{трап}}$ ($\Delta\tau_{\text{трап}} = 2 - 1,25 = 0,75$), но $q_{\text{трап}}$ при этом увеличились более чем вдвое ($\Delta q_{\text{трап}} = 9,25 - 4 = 5,25$).

Уменьшение μ_c до нуля (рис. 7) не изменяет график $\tau_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$. Остаётся неизменной и общая тенденция зависимости $q_{\text{трап}}(\varepsilon_{\text{лин}})$ за исключением зоны $\varepsilon_{\text{лин}} < 1$. В ней отсутствуют экстремумы $q_{\text{разг}}$, $q_{\text{торм}}$, а следовательно, и $q_{\text{трап}}$. Кроме того, графики $q_{\text{разг}}$ и $q_{\text{торм}}$ сливаются в один, а $q_{\text{уст}} = 0$. Монотонный рост произведения $(q \cdot \tau)_{\text{трап}}$ не позволяет формально выделить диапазон рациональных значений $\varepsilon_{\text{лин}}$, но критерий $\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}}$ сохраняет свою информативность. Для диапазона $(1 <$

$\varepsilon_{\text{лин}} < 2$) при $\mu_c = 0$ значение $\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}} = 0,5/(4 - 2) = 0,25$ против $\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}} = 0,5/1,5 = 0,33$ при $\mu_c = 1$. Для диапазона ($2 < \varepsilon_{\text{лин}} < 4$) при $\mu_c = 0$ значение $\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}} = 0,25/(8 - 4) = 0,0625$ против $\Delta\tau_{\text{трап}}/\Delta q_{\text{трап}} = 0,25/3,75 = 0,067$ при $\mu_c = 1$.

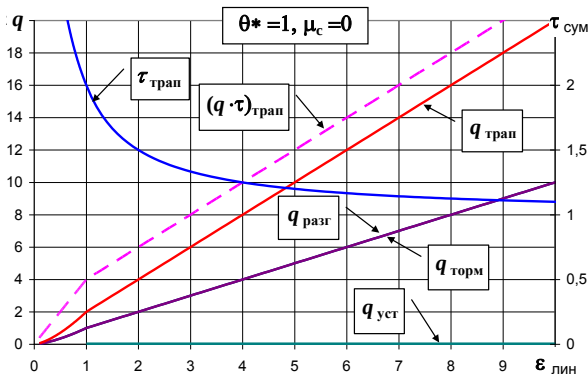


Рис. 7. Изменение электрических потерь и времени отработки для $\theta^* = 1$, $\mu_c = 0$ при варьировании $\varepsilon_{\text{лин}}$

Полученные выше оценки эффективности работы позиционного электропривода не в полной мере учитывали его энергетику, поскольку рассматривались только электрические потери в якорной цепи. При этом не рассматривались общий баланс энергии и её циркуляция за цикл работы. Традиционным показателем энергетической эффективности является цикловой коэффициент полезного действия, определяемый как отношение полезной работы к работе движущих сил за цикл движения механизма

$$\eta = \frac{W_{\text{вых}}}{W_{\text{вх}}} = \frac{\int_0^{t_u} P_{\text{вых}}(t) dt}{\int_0^{t_u} P_{\text{вых}}(t) dt + \sum_j \int_0^{t_u} \Delta P_j(t) dt}, \quad (18)$$

где $P_{\text{вых}}(t) = P_{\text{мех}}(t) = M(t) \cdot \omega(t)$ — мгновенное значение механической мощности.

Однако для ряда электроприводов позиционных механизмов (сварочных роботов, перемещения стола сверлильных станков, упаковочных автоматов...) $\mu_c \approx 0$, поскольку в кинематической цепи практически отсутствуют силы сопротивления перемещению рабочих органов. В этом случае график $P_{\text{мех}}(t)$ становится симметричным относительно горизонтальной оси, а его интеграл и η стремятся к нулю, хотя потребляемая от источника на этапе разгона энергия только в незначительной части теряется (преобразуется в тепло), а основная её доля возвращается в источник на этапе торможения. Другими словами, КПД как критерий энергетической эффективности при $\mu_c \approx 0$ становится неинформативным. В [16] предложен обобщённый критерий эффективности электромеханического преобразования энергии

$$H = \frac{W_{i,i+1}}{W_{i,i+1} + \sum_j \Delta W_j}, \quad (19)$$

в котором энергия, передаваемая между соседними элементами силового канала, определяется как

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_2} |P_{i,i+1}(t)| dt. \quad (20)$$

В отличие от формулы (18) расчёта η при расчёте H по (19) в (20) интегрируется не мгновенная мощность, а её абсолютная величина, т.е. передача энергии в любом направлении считается полезной, требуемой заданным циклом работы. Это делает значение $W_{i,i+1}$ неотрицательным при любых циклах работы и графиках $P_{i,i+1}(t)$. Из-за этого критерий H является более информативным, чем цикловой η , хотя для циклов однонаправленного преобразования энергии он полностью совпадает с η . Для рассматриваемого случая трапецидальной тахограммы с $v_{\text{max}} = 1$ и $\mu_c = 0$

$$H = \frac{2W_k}{2W_k + \Delta W_{\text{эл}}}, \quad (21)$$

где $W_k = \int_0^{t_p} M \omega dt = \frac{J \omega_{\text{max}}^2}{2}$ — кинетическая энергия к моменту окончания разгона, $\Delta W_{\text{эл}} = 2I^2 R \cdot t_p = 2J \cdot \omega_{\text{max}}^2 \frac{T_m}{t_p}$ — суммарные электрические потери за время цикла.

После алгебраических преобразований и введения относительных величин формула (21) приобретает вид

$$H = \frac{1}{1 + 2T_m/t_p} = \frac{1}{1 + 2\Delta v \cdot \varepsilon_{\text{лин}}}, \quad (22)$$

где $\Delta v = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}})/\omega_{\text{ном}}$ — относительный перепад скорости при номинальной нагрузке.

Из анализа (22) следует, что эффективность позиционного электропривода для циклов с $v_{\text{max}} = 1$ и $\mu_c = 0$ полностью определяется соотношением времени разгона t_p и электромеханической постоянной времени T_m , или жёсткостью механической характеристики и задаваемым ускорением. Для типового значения $\Delta v = 0,05$ при $\varepsilon_{\text{лин}} = 1$ обобщённый критерий эффективности $H = 0,91$, а при $\varepsilon_{\text{лин}} = 5$ уменьшается до 0,667.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сравнения электрических потерь в позиционном электроприводе при отработке заданного перемещения с нулевым значением начальной и конечной скоростей по линейным, параболическим и квазиоптимальным трапецидальным тахограммам при варьировании их параметров установлено наличие режима «минимум минимум» для каждого вида тахограммы. Значения времени отработки и электрических потерь в этих режимах определяются моментом сопротивления.

Для отработки одного и того же перемещения за одно и то же время по параболической тахограмме требуется увеличение $\varepsilon_{\text{нач}}$ на 50% по сравнению с $\varepsilon_{\text{лин}}$, но значение максимума v_m будет на 25% меньше, чем для треугольной тахограммы. При этом электрические потери уменьшаются на 12,5%.

Для режимов «минимум миниморум» применение параболических тахограмм по сравнению с треугольными сокращает как время отработки, так и выделяемые электрические потери, однако эти различия не превышают 7%. Для квазиоптимальной трапецеидальной тахограммы при одинаковом с параболической тахограммой временем отработки потери больше всего на 3%.

Для треугольных и трапецеидальных тахограмм определены области рациональных значений ускорения, обеспечивающих сокращение времени отработки по сравнению с режимом «минимум миниморум».

Для позиционных электроприводов с $\mu_c \approx 0$ КПД как критерий энергетической эффективности становится неинформативным. Для этого случая применение обобщенного критерия эффективности электромеханического преобразования энергии позволило получить оценки влияния параметров тахограмм на энергетику позиционного электропривода и выделить зону их рациональных значений.

В дальнейшем предполагается распространить проведенный анализ оптимальных и квазиоптимальных тахограмм позиционного электропривода на случаи ослабления магнитного потока двигателя постоянного тока, применения двигателей переменного тока, зависимости момента сопротивления от скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.Ф. Новый словарь русского языка. Толково-словообразовательный. М.: Русский язык, 2000.
2. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. М.: Дело,

2003. 520 с.

3. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 424 стр.
4. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. М.: Наука, 1976.
5. Bellman R.E. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
6. Беллман Р.Е. Динамическое программирование. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.
7. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш. шк., 1989. 263 с.
8. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 560 с.
9. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993.
10. Timothy J. Ross Fuzzy Logic with Engineering Applications. Third Edition Paperback, 2010.
11. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2007.
12. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.—736 с.
13. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.
14. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. 144 с.
15. Козырев С.К., Казади Б. Оптимальные переходные процессы в электроприводах постоянного тока / Мезвуз. сб. тр. № 30. М.: МЭИ, 1984.
16. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерий эффективности электромеханического преобразования энергии // Электричество. 1987. № 10.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTIMUM AND QUASIOPTIMUM CONTROL OF THE POSITIONAL ELECTRIC DRIVE BY A CRITERION OF A MINIMUM OF ELECTRIC LOSSES

Bichkov M.G., Kuznetsova V.N.

By the example of the D.C. motor with independent excitation, the optimization of positional electric drive tachograms by criterion of a minimum of electric losses in anchor chain during the process of adjustment the specified displacement discontinuities with a rated magnetic flow. The comparative analysis of triangular, parabolic and quasioptimum trapezoidal tachograms was carried out. Parameters of the modes "minimum minimorum" and a zone of rational change of acceleration for a variation of movements time was determined.

Using the generalized criterion of electromechanical transformation of energy, the energetics of positioning electric drive when the moment of resistance to motion is near to zero was investigated.

Keywords: position electric drive, optimal tachograms, quasioptimum control, criterion of electromechanical transformation.

REFERENCES

1. Efremova T.F. *Novyj slovar' russkogo yazyka. Tolkovo-slovoobrazovatel'nyj* [New dictionary of Russian language. Intel-ligible-word-formative]. Moscow: Russkij yazyk, 2000.
2. Lopatnikov L.I. *Ekonomiko-matematicheskij slovar': Slovar' sovremennoj ehkonomicheskoy nauki* [Economics and Mathematics Dictionary: Dictionary of modern economics]. Moscow: Delo, 2003, 520 p.
3. Moiseev N.N. *Chislennye metody v teorii optimal'nyh*

sistem [Numerical methods in the theory of optimal systems]. Moscow: Nauka, 1971, 424 p.

4. Pontryagin L.S., Boltyanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1976.
5. Bellman R.E. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
6. Bellman R.E. *Dinamicheskoe programmirovaniye* [Dynamic Programming]. Moscow: Izd-vo inostrannoj literatury, 1960.
7. Aleksandrov A.G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and adaptive systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 263 p.
8. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Saint-Petersburg: BXB-Peterburg, 2007, 560 p.
9. Tehrano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nyochetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir, 1993.
10. Timothy J. Ross Fuzzy Logic with Engineering Applications. Third Edition Paperback, 2010.
11. Besekerskiy V.A. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie* [The theory of automatic control systems]. Saint-Petersburg: Professiya, 2007.
12. *Sintez regulyatorov i teoriya optimizacii sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Synthesis of regulators and opti-

mization theory of automatic control systems]. Edited by N.D. Egupov. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.EH. Bauman, 2000, 736 p.

13. Klyuchev V.I. *Teoriya ehlektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1998.

14. Petrov Yu.P. *Optimal'noe upravlenie elektricheskim privodom s uchetom ogranichenij po nagrevu* [Optimal control of power subject to the limitations of heat]. Leningrad: Energiya,

Leningradskoe otdelenie, 1971, 144 p.

15. Kozyrev S.K., Kazadi B. *Optimal'nye perekhodnye processy v elektroprivodah postoyannogo toka* [Optimal transients in electric D.C.]. Moscow: ME I, 1984.

16. Il'inskij N.F., Gornov A.O. *Kriterij effektivnosti elektromekhanicheskogo preobrazovaniya energii* [The criterion of the efficiency of electromechanical energy conversion]. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 10, 1987.

УДК 62-52-83:656.56

Крюков О.В.

АНАЛИЗ СТРУКТУР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрена структура существующего парка электроприводов газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах России. Проанализированы основные недостатки нерегулируемых электрически агрегатов на компрессорных станциях и возможности наиболее эффективных и наукоемких проектов с применением новых принципов и алгоритмов частотного регулирования параметров транспорта газа на базе технологически связанных электроприводных агрегатов. Предложены перспективные направления совершенствования электроприводов нагнетателей с помощью шести вариантов топологий высоковольтных преобразователей частоты. Проанализированы принципиальные схемы и энергетические характеристики многоуровневых каскадных преобразователей, включая спектры гармонического состава выходного тока и напряжения. Рассмотрены характерные примеры реализации высококачественной силовой преобразовательной техники и фильтрокомпенсирующих устройств для электроприводных газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистрального транспорта газа в России.

Ключевые слова: компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, электропривод, частотное регулирование, синхронный двигатель, модернизация, энергосбережение, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ. СОСТОЯНИЕ ПАРКА ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В настоящее время парк газоперекачивающих агрегатов на магистральных газопроводах составляет около 4 тысяч единиц, из них 17,6% (700 агрегатов) имеют электрический привод от высоковольтных синхронных двигателей мощностью 4,0 - 12,5 МВт. Суммарная мощность электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) составляет около 6000 МВт. В год они расходуют до 10 – 13 млрд кВт·ч электроэнергии [1].

Существующие нерегулируемые по скорости ЭГПА имеют два основных недостатка:

1. Негативное влияние прямых пусков мощных двигателей, снижающее надежность и ресурс двигателей и агрегатов в целом; 5-7-кратные пусковые токи разрушают изоляцию статора и вызывают перегрев ротора; допускается ограниченное число прямых пусков (до 150), после чего необходим ремонт двигателя; при питании компрессорных станций от протяженных электрических сетей ограниченной мощности большие пусковые токи могут вызвать недопустимые провалы напряжения.

2. Неприспособленность к переменным режимам работы магистральных газопроводов; использование регулируемого электропривода дает на компрессорных станциях сокращение энергетических затрат на 10-25%. Это достигается за счет того, что ЭГПА всегда работают в оптимальном по КПД режиме. Изменение скорости вращения агрегата позволяет не только экономично регулировать работу компрессора, но и эффективно защищать его в комбинации с другими средствами от попадания в зону неустойчивой работы при изменении входных параметров. Возможность регули-

рования скорости обеспечивает плавный частотный пуск ЭГПА при токе, не превышающем номинальный.

Используемое при нерегулируемом электроприводе дросселирование на нагнетательном тракте связано со значительными потерями электроэнергии. На рис. 1 показано сравнение зависимости потребляемой мощности от расхода газа при дросселировании и при регулировании скорости вращения агрегата. Сравнение графиков потребляемой мощности показывает, сколько значительна экономия электроэнергии при регулировании изменением скорости вращения.

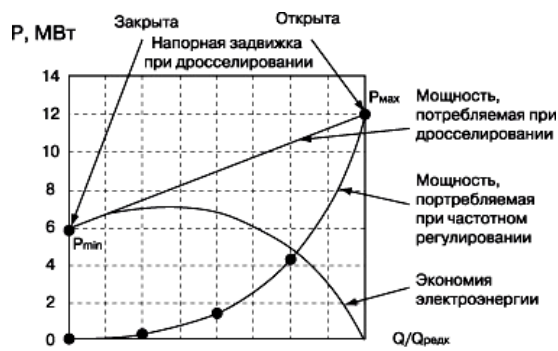


Рис. 1. Рабочие характеристики при различных способах регулирования производительности

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭГПА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Использование преобразователей частоты (ПЧ) для питания синхронных двигателей (СД) позволяет осуществлять групповое управление несколькими ЭГПА [2]. При этом в группе из нескольких агрегатов один или два работают в нерегулируемом режиме, получая питание от сети, а скорость вращения других

агрегатов может регулироваться по условиям технологического процесса. При этом необходимое количество преобразователей частоты сокращается в два раза. Кроме того, пуск всех двигателей производится каскадно при питании от того же преобразователя частоты. Если двигатель должен работать с номинальной скоростью, то после окончания пуска преобразователь частоты синхронизируется с сетью, и двигатель, вставая на байпас, переключается на питание от сети. При необходимости регулирования скорости вращения двигателя достаточно быстро отключается от сети и переключается на питание от преобразователя частоты.

Таким образом, применение частотно-регулируемого синхронного электропривода ГПА дает следующие преимущества:

- значительную экономию электроэнергии;
- возможность автоматического поддержания заданного давления в напорном трубопроводе;
- плавный пуск и останов ЭГПА с исключением гидроударов в газопроводной системе и ударных электрических и механических нагрузок на механизм и электрическую сеть;
- увеличение срока службы механического и электрического оборудования;
- повышение эксплуатационной надежности ЭГПА;
- снижение эксплуатационных расходов.

ПЧ для питания СД ЭГПА должны отвечать следующим основным требованиям:

- иметь большую мощность по отношению к мощности приводного электродвигателя – 5000, 7000, 14000 кВА;
- иметь высоковольтное (ВВ) исполнение при входном и выходном напряжении 6 (10) кВ;
- хорошее качество выходного напряжения ПЧ с содержанием высших гармоник не выше значений $THD \leq 3\%$. Столь высокие требования связаны с тем, что используемые в ЭГПА СД имеют массивную конструкцию ротора, и наличие высших гармоник в токе статора может вызвать перегрев ротора за счет вихревых токов;
- генерация в питающую сеть высших гармоник также ограничена требованиями, регламентируемыми ГОСТ 13109-97.

ТОПОЛОГИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Анализ выпускаемых в настоящее время зарубежными и отечественными фирмами ВВ ПЧ показал, что указанным требованиям в наибольшей степени отвечает топология многоуровневого ПЧ с каскадным соединением однофазных низковольтных преобразователей типа автономного инвертора напряжения (АИН).

Примером может служить серия преобразователей частоты ВЧРП, которая разрабатывалась и выпускается сегодня по указанной топологии. Принципиальная схема ВВ ПЧ данной топологии представлена на рис. 2.

Высоковольтный многоуровневый ПЧ для ЭГПА состоит, как правило, из изолирующего входного трансформатора с 15 группами трехфазных вторичных обмоток. Эти обмотки соединены в треугольник и смещены по фазе на 60 электрических градусов относительно друг друга. Это позволяет уменьшить влия-

ние преобразователя на питающую сеть, т.к. ток в сети имеет минимальные искажения.

Как следует из рис. 3, степень искажения входного тока рассмотренного преобразователя частоты значительно ниже требований, в том числе зарубежных стандартов. Коэффициент же мощности преобразователя на стороне сети очень высокий и составляет не ниже 0,96.

Гармонический состав входного тока представлен на рис. 3. Здесь ломаной линией показаны ограничения по гармоническому составу тока в соответствии с требованиями IEEE519.

Каждая группа вторичных обмоток питает свой отдельный однофазный инвертор напряжения, схема которого показана на рис. 4.

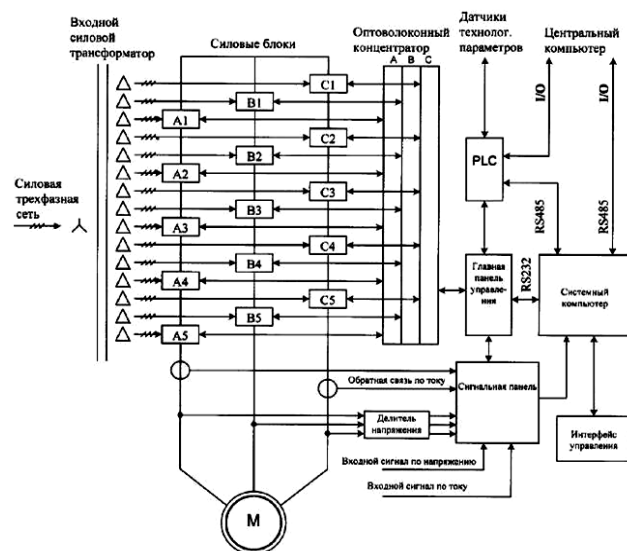


Рис. 2. Схема многоуровневого каскадного преобразователя частоты

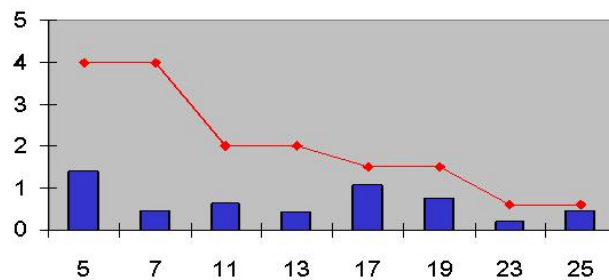


Рис. 3. Гармонический состав входного тока

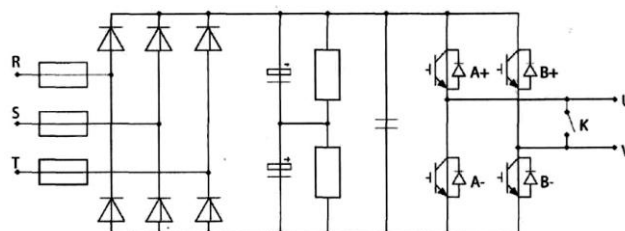


Рис. 4. Схема силового блока каскадного преобразователя частоты

Силовая ячейка содержит трехфазный выпрямитель, конденсаторный фильтр, однофазный инвертор на IGBT модулях и байпасный тиристорный ключ К.

Принцип формирования выходного напряжения преобразователя поясняется на рис. 5. Минимальное напряжение однофазного инвертора составляет 690 В. Последовательное соединение 5 блоков позволяет по-

лучить максимальное эффективное значение фазного напряжения на выходе преобразователя 3450 В (линейное напряжение 6000 В). Посредством системы управления фазы выходного напряжения отдельных ячеек сдвинуты на 12 электрических градусов, что обеспечивает взаимную компенсацию высших гармоник.

Регулирование величины выходного напряжения производится синхронизированной широтно-импульсной модуляцией напряжения в каждой ячейке. Выходное напряжение преобразователя в зависимости от частоты изменяется пропорционально. В результате данного принципа построения схемы ток и напряжение на выходе преобразователя частоты имеют практически синусоидальную форму.

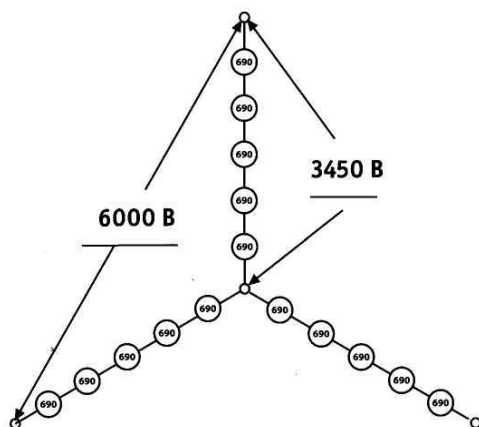


Рис. 5. Принцип сложения напряжений в преобразователе частоты на 6,0 кВ

Одним из эксплуатационных достоинств данной схемы является повышенная живучесть. В случае выхода из строя силового блока отключение высоковольтного преобразователя не происходит. В этом случае срабатывает ключ K , который шунтирует инвертор блока, выводя его из работы. Одновременно выводятся из работы по одному силовому блоку в других фазах. Система автоматического управления повышает напряжение в оставшихся в работе блоках, и многоуров-

невый преобразователь частоты продолжает функционировать.

Главное достоинство многоуровневых каскадных преобразователей – это решение проблемы электромагнитной совместимости с питающей сетью и приводным синхронным электродвигателем мегаваттного класса. Качество энергии на выходе такого преобразователя частоты иллюстрируется осциллограммами, изображенными на рис. 6.

Преобразователь частоты ВЧРП по требованию заказчика может быть поставлен комплектно совместно с высоковольтной секцией байпасного выключателя, шунтирующего преобразователь частоты в случае необходимости его ремонта или регламентного обслуживания, что повышает надежность функционирования ЭГПА. Система управления ВЧРП реализована на базе промышленного компьютера и обеспечивает следующие функции управления:

- местное или дистанционное ручное регулирование скорости;
- работу в составе автоматизированной системы контроля давления газа. С этой целью предусмотрено включение преобразователя частоты в АСУ посредством интерфейса RS485 и открытых протоколов Modbus, Profibus, Ethernet;
- ПИД-регулятор для локальной системы поддержания заданных технологических параметров;
- удобное объектноориентированное программное обеспечение для управления и контроля с интерфейсом на русском языке;
- ВЧРП имеет развитую систему диагностики, позволяющую определить место возникновения неисправности в случае срабатывания систем защиты.

Регулируемые высоковольтные электроприводы переменного тока на базе преобразователей ВЧРП успешно эксплуатируются на ряде отечественных предприятий [3], в том числе: электропривод сетевого насоса котельной г. Одинцово; электропривод группы сетевых насосов котельной г. Астрахани; электропривод насосов второго подъема ЗАО Челныводоканал и др.

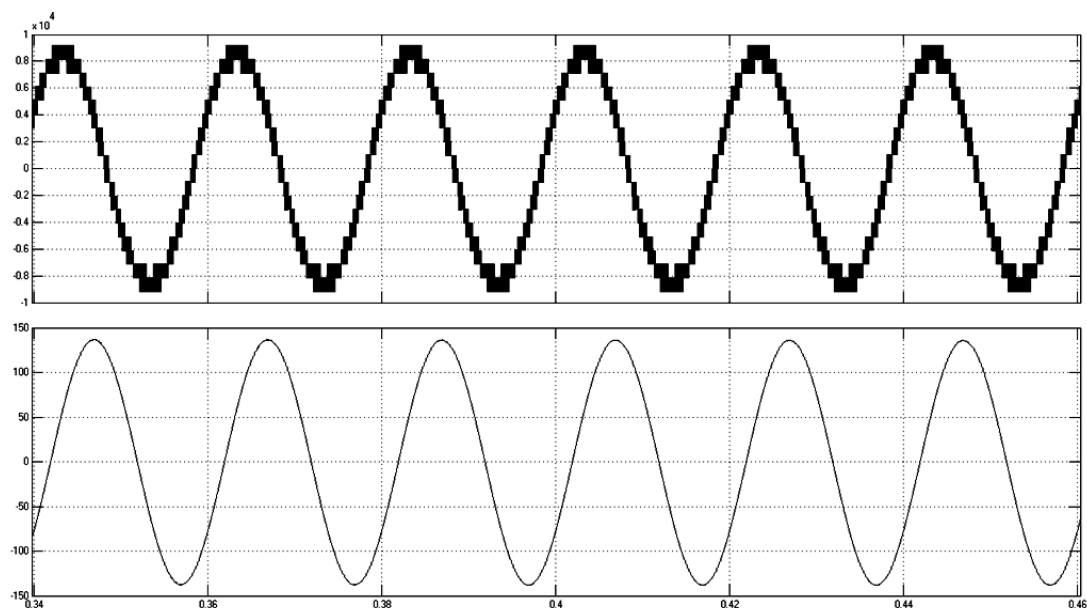


Рис. 6. Осциллограмма выходного тока и напряжения ПЧ при выходной частоте 50 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали перспективность использования современной силовой преобразовательной техники на ответственных механизмах мегаваттного класса, включая существующие нерегулируемые электроприводные газоперекачивающие агрегаты компрессорных станций магистрального транспорта газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение и автоматизация электрообору-

дования компрессорных станций: монография / Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др.; под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС, 2012. 572 с.

2. Пужайло А.Ф., Рубцова И.Е., Крюков О.В. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Компрессорная техника и пневматика. 2012. №5. С. 29-34.

3. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности ЭГПА // Газовая промышленность. 2014. №6. С. 86-89.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MOTORS AND PERSPECTIVES OF THEIR DEVELOPMENT

Krjukov O.V.

The structure of existing fleet of electric drives for gas pumping units at the main gaslines in Russia was reviewed. The main disadvantages of unregulated electrical units at the compressor stations and the features of most efficient and science-intensive projects with the application of a new principles and algorithms of frequency regulation of the gas transfer parameters, based on for technologically related electrically-driven units were analyzed. Prospective lines of improving the electric drives of superchargers with the application of six variants of high voltage frequency inverter topologies. A functional diagrams and an energetic characteristics of multilevel cascade converters, including the range of harmonic composition of output current and voltage were analyzed. Case studies of implementation high quality power converter equipment and filter compensative devices for electric driven gas pumping units at the compressor stations of main gas pipelines in Russia were reviewed.

Keywords: compressor station, gas pumping unit, electric drive, frequency regulation, synchronous motor, upgrading,

energy saving, energy efficiency.

REFERENCES

1. Puzhajlo A.F., Savchenkov S.V., Krjukov O.V. i dr. *Jennergosberezhenie i avtomatizacija jelektroroborudovaniya kompressornyh stancij* [Energy saving and automation of electrical equipment at the compressor stations: monograph]. Nizhnyj Novgorod: Vektor TiS, vol. 3, 2012, 572 p.

2. Puzhajlo A.F., Kryukov O.V., Rubtsova I.E. *Jennergosberezhenie v agregatah kompressornyh stancij sredstvami chastotno-reguliruemogo jelektroprivoda* [Energy-saving in units of compressor stations by means of the frequency-controlled electric drive]. *Kompressornaja tehnika i pnevmatika* [Compressor equipment and pneumatic], 2012, no.5, pp. 29-34.

3. Krjukov O.V., Krasnov D.V. *Perspektivy primeneniya preobrazovatelej chastoty dlja regulirovaniya proizvoditel'nosti JeGPA* [Prospects of application of frequency inverters for controlling the performance EDGPU]. *Gazovaja promyshlennost'* [Gas industry], 2014, no. 6, pp. 86-89.

УДК 62 - 83:681.51

Цытович Л.И., Дудкин М.М., Рахматулин Р.М., Брылина О.Г., Тюгаев А.В.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В статье рассматриваются устройства синхронизации для ведомых сетью силовых вентильных преобразователей, выполненные на базе интегрирующих развертывающих преобразователей с частотно-широотно-импульсной модуляцией (РП). Приведены структурные схемы, временные диаграммы сигналов и условия синхронизации частоты переключений РП внешним биполярным прямоугольным и гармоническим сигналами.

На примере трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя постоянного тока рассмотрены функциональные схемы перекрестной и интервало-кодовой синхронизаций. Приведена принципиальная схема РП, даны основные расчетные соотношения и рекомендации по выбору ее параметров.

Статья рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, наладкой и эксплуатацией силовой преобразовательной техники.

Ключевые слова: устройство синхронизации, вентильный преобразователь, развертывающий преобразователь, интервало-кодовая синхронизация, перекрестная синхронизация, фазосдвигающее устройство, дешифратор, распределитель импульсов.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы электроснабжения как стационарного, так и автономного базирования характеризуются высоким уровнем искажений с трудно предсказуемыми параметрами, зачастую выходящими за допустимые нормы и играющими роль дестабилизи-

рующих факторов в работе не только вентильных преобразователей (ВП), но и технологических установок в целом [1-5]. Поэтому создание систем управления ВП, способных нейтрализовать действие внешних возмущающих воздействий, в частности со стороны сети, является актуальной задачей, направленной на повы-

шение надежности работы всего комплекса электро-технического оборудования промышленных предприятий. Причем создание таких систем актуально не только применительно к новым разработкам в области ВП, но и к действующему оборудованию, подлежащему реконструкции.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕНТИЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ
И ПРИНЦИП ЕЕ ДЕЙСТВИЯ

подавляющее большинство силовых ведомых сетью ВП строятся по принципу многоканальной синхронной системы [6-8] (рис. 1, а), включающей n -е число идентичных по своей структуре каналов регулирования, где n – число фаз напряжения сети (в дальнейшем ограничимся случаем $n=3$). Каждый из каналов содержит устройство синхронизации (УС) УС-А, УС-В, УС-С, фазосдвигающие устройства ФСУ-А, ФСУ-В, ФСУ-С с формирователями импульсов управления, распределитель импульсов управления РИ и силовой блок ключей, например тиристоров СБТ. ФСУ преобразуют сигнал управления, подключаемый к информационному входу, в величину угла управления тиристорами СБТ.

Как показывает практика, наиболее уязвимым с позиций помехоустойчивости каналом систем управления ВП являются УС [9, 10], которые в большинстве

практических случаев представляют собой каскадное включение сглаживающего фильтра Φ , например, апериодического первого порядка и релейного элемента РЭ с симметричными относительно нулевого уровня порогами переключения (рис. 1, б) [11].

Недостаток УС типа «Ф–РЭ» очевиден – при изменении амплитуды и/или частоты напряжения сети заданный угол синхронизации существенно меняется, что сказывается на характеристиках ВП в целом, а в ряде случаев может привести к его аварийному отключению. Одной из причин низкой помехоустойчивости УС является малое значение постоянной времени фильтра Φ , который настраивается на угол порядка 30 эл.град, соответствующей точке естественной коммутации напряжения сети. Повышение постоянной времени фильтра Φ при одновременном уменьшении порогов переключения РЭ также нежелательно из-за высокой чувствительности последнего к импульсным помехам. Проблема помехоустойчивости контуров синхронизации ВП, в частности в автоматизированном электроприводе постоянного тока, в немалой степени обострилась благодаря широкому внедрению преобразователей частоты в электроприводах переменного тока, генерирующих в сеть высокочастотные гармоники широтно-импульсной модуляции, не связанные по кратности с частотой напряжения сети.

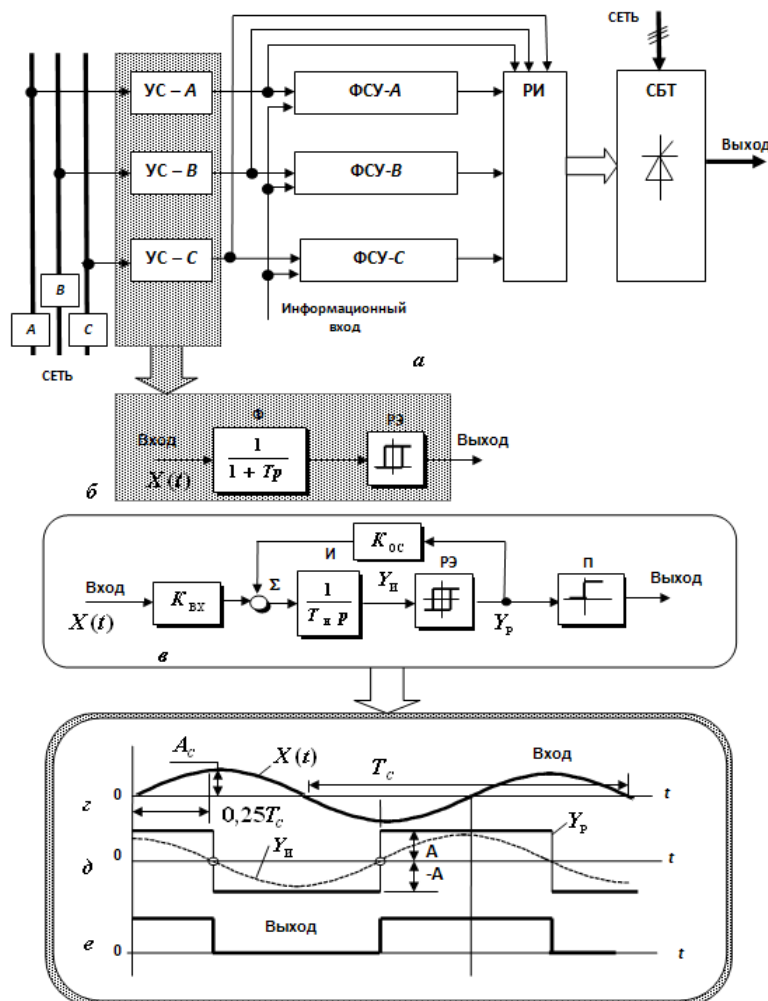


Рис. 1. Функциональная схема синхронной системы управления тиристорным преобразователем (а), классическая структурная схема компараторного устройства синхронизации (б), структурная схема интегрирующего устройства синхронизации (в) и временные диаграммы его сигналов (г-е)

В этих условиях не только проектировщикам силовой преобразовательной техники, но и обслуживающему персоналу действующих промышленных электроустановок необходимо иметь эффективный способ повышения эксплуатационной надежности ВП, который, обладая простотой технической реализации и высокой эффективностью подавления помех со стороны сети, не требовал бы внесения кардинальных изменений в структуру системы управления ВП.

Многолетние теоретические исследования и практический промышленный опыт кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета в области создания и реконструкции силовых преобразователей постоянного и переменного тока для объектов с «проблемной» сетью показал, что наиболее эффективным способом решения задач в сфере электромагнитной совместимости ВП является построение их систем импульсно-фазового управления, включая и УС, на основе методов интегрирующего развертывающего преобразования [12-15].

Рассмотрим этот метод применительно к УС трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя (см. **рис. 1, а**).

В большинстве случаев основу развертывающих систем составляет базовая структура интегрирующего развертывающего преобразователя (РП) (**рис. 1, в**), включающая в себя сумматор Σ , интегратор И, релейный элемент РЭ с симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса, а также пропорциональные звенья $K_{ВХ}$ и $K_{ОС}$ на входе и в цепи обратной связи РП соответственно. Выходной сигнал РЭ меняется дискретно в пределах $\pm A$, а его пороги переключения $\pm b$ симметричны относительно нулевого уровня.

РП представляет собой автоколебательную систему с частотно-широотно-импульсной модуляцией и знакопеременной обратной связью. Его особенность заключается в том, что при соблюдении определенных условий, о которых речь пойдет ниже, РП может переходить в режим вынужденных переключений (синхронизации) с внешним периодическим сигналом и преобразовываться из частотно-широотно-импульсной в широтно-импульсную систему. При этом наиболее часто для внешней синхронизации РП используется непосредственно напряжение сети, либо прямоугольные биполярные импульсы со средним нулевым значением, получаемые путем преобразования синусоидального сигнала с помощью компаратора.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что условием синхронизации РП прямоугольными биполярными импульсами является

$$(\bar{T}_{\Pi} \cdot \bar{A}_{\Pi}) \geq 1, \quad (1)$$

где $\bar{T}_{\Pi} = T_{\Pi} / T_0$ – нормированное значение периода T_{Π} прямоугольных импульсов синхронизации; $T_0 = 4bT_{и}$ – период выходных импульсов РП при его работе в режиме собственных автоколебаний; $\bar{b} = |b/A|$ – нормированное значение порогов переключения РЭ; $\pm A$ – амплитуда выходных импульсов РЭ;

$\bar{A}_{\Pi} = |A_{\Pi} / A|$ – нормированное значение амплитуды импульсов синхронизации (кратность синхронизации); $T_{и}$ – постоянная времени интегратора РП.

Иными словами, синхронизация РП биполярными прямоугольными импульсами наступает при условии превышения модулем вольт-секундной площади синхронизирующего воздействия значения модуля вольт-секундной площади выходных импульсов РП за период его собственных автоколебаний.

Аналогично для сигнала вида $X(t) = A_c \cdot \sin \omega t$ (**рис. 1, з**) условиями внешней синхронизации являются

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

$$dY_{и}(t)/dt < dX_c(t)/dt,$$

где $\bar{T}_c = T_c / T_0$, $\bar{A}_c = |A_c / A|$ – нормированное значение периода T_c и амплитуды A_c сигнала $X(t)$ соответственно; $Y_{и}$ – выходной пилообразный сигнал развертки на выходе интегратора И при работе РП в режиме собственных автоколебаний, ограниченный по амплитуде порогами переключения $\pm b$ РЭ.

Здесь, по сравнению с уравнением (1), появляется дополнительное условие, которое говорит о том, что производная синхронизирующего воздействия $X(t)$ при его переходе через нулевой уровень должна превышать производную пилообразного сигнала развертки $Y_{и}$, которую она имеет при работе РП в режиме собственных автоколебаний с нулевым значением постоянной составляющей сигнала на его информационном входе.

В режиме внешней синхронизации, когда роль несущей частоты выполняет, например, гармонический сигнал $X_c(t)$, РП имеет свойства близкие к апериодическому фильтру первого порядка $W(p) = 1/(1+T_p p)$ с постоянной времени $T_p \approx \pi \cdot T_c \cdot \bar{A}_c / 16$, автоматически перестраиваемой в функции параметров синхронизирующего воздействия (напряжения сети) [16, 17].

Фазовый сдвиг (начальный угол синхронизации α_c) между синхронизирующим воздействием и выходными импульсами $Y_{и}$ РП (см. **рис. 1, з, д**) зависит от нормированной частоты $\bar{f}_c = f_c / (f_0 = T_0^{-1})$ сигнала синхронизации и $\bar{A}_c$. Равенство $\alpha_c = -90$ эл.град, что является, как будет показано ниже, наиболее приемлемым для построения каналов синхронизации ВП на основе РП, достигается при условии равенства частоты собственных автоколебаний РП и частоты сигнала синхронизации $X(t)$.

Необходимо отметить, что в промышленных условиях, где стабильность частоты сети достаточно высокая, требуемое значение постоянной времени T_p РП устанавливается путем изменения глубины синхронизации $\bar{A}_c$, что принципиально отличает данный класс УС от традиционной структуры на **рис. 1, б**.

УСТРОЙСТВА СИНХРОНИЗАЦИИ
НА БАЗЕ РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Синхронизация ВП с применением РП может выполняться различными методами.

На **рис. 2, а** приведена функциональная схема интервалокодового устройства синхронизации, предназначенная для трехфазных реверсивных тиристорных преобразователей с раздельным управлением [18 – 20].

Каждый из каналов синхронизации УС – А, УС – В и УС – С (см. **рис. 2, а**) выполнен на основе РП, где для согласования с элементами цифровой электроники введен повторитель П, преобразующий биполярные выходные импульсы РЭ в однополярный импульсный сигнал (см. **рис. 1, в, е; рис. 2, в-д**). Далее выходному сигналу канала УС – А (см. **рис. 2, в**) присваивается значение Q_0 младшего разряда, а выходу УС – С – значение Q_2 (рис. 2, д) старшего разряда двоичного кода. В результате на каждом из интервалов $\Delta t_i = 60$ эл.град (см. **рис. 2, б-д**) формируется своя трехразрядная двоичная последовательность, десятичное значение которой показано на **рис. 2, е**.

Так, интервалу коммутации T_{1-2} (см. **рис. 2, б**) соответствуют числа «3–2–6», интервалу T_{3-4} (рис. 2, з) – числа «6–4–5», а интервалу T_{5-6} (рис. 2, и) – последовательность чисел «5–1–3». Затем с помощью трехразрядного двоичного дешифратора и логических элементов Л1–Л3 функции «ЗИЛИ» (см. **рис. 2, а**) для каждо-

го из перечисленных интервалов коммутации формируется сигнал синхронизации (**рис. 2, ж-и**).

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

Необходимо также отметить, что появление на выходных шинах DC чисел «0» и «7» свидетельствует о нарушении алгоритма работы ВП, так как эти числа отсутствуют в числовом ряде «3–2–6–4–5–1», поэтому здесь необходимо аварийное отключение ВП, что и реализуется с помощью элемента Л4 (см. **рис. 2, а**). Кроме того, при данном способе синхронизации может быть реализована диагностика катастрофических отказов УС – А, УС – В и УС – С, когда они переходят в статическое состояние логического «0» или «1».

Более простой способ синхронизации каналов управления ВП, легко реализуемый в действующих установках при их реконструкции, показан на **рис. 2, к**. Из диаграмм сигналов (**рис. 2, б-д**) видно, что сигнал логической «1» для соответствующего интервала коммутации «1–2», «3–4», «5–6» может быть получен за счет метода «перекрестной» синхронизации, когда ФСУ – А синхронизируется УС – В, ФСУ – В получает сигнал синхронизации от УС – С, а ФСУ – С – от канала синхронизации УС – А.

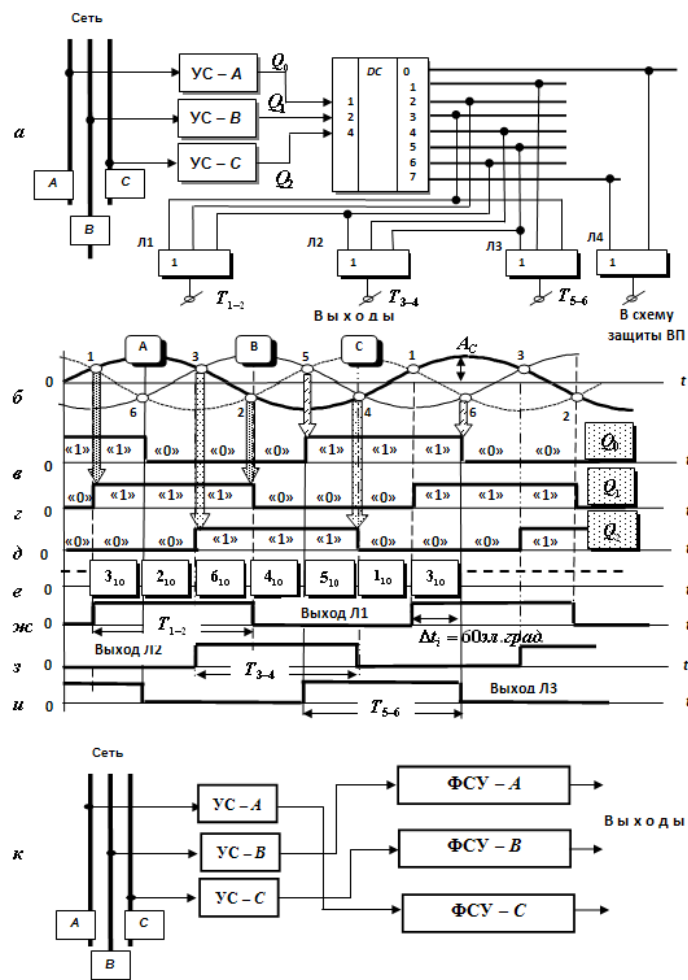


Рис. 2. Функциональная схема интегрирующего интервалокодового двоичного устройства синхронизации (а), временные диаграммы его сигналов (б – и) и функциональная схема системы перекрестной синхронизации систем импульсно-фазового управления (к)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Предложен перекрестный и родственный ему интервал-кодовый способы синхронизации каналов систем импульсно-фазового управления ВП на основе интегрирующих РП. Первый способ синхронизации отличается простотой технической реализации, второй позволяет диагностировать катастрофические отказы каналов синхронизации ВП и осуществлять его аварийное отключение.

2. Приведены условия синхронизации РП внешним биполярным прямоугольным и гармоническим сигналами и показано, что в режиме внешней синхронизации РП обладает свойствами адаптивного апериодического фильтра первого порядка с постоянной времени, зависящей от амплитуды и частоты синхронизирующего воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
- Brinkis K., Staltmanis A. The automated control of a power system // *Baltic electrical engineering review*. 1997. №2(6). Pp. 39-44.
- Качалов А.В., Цытович Л.И., Дудкин М.М. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентильными преобразователями // *Практическая силовая электроника*. 2010. №1(37)/2010. С. 42-51.
- Адаптивная система синхронизации трехфазного мостового реверсивного тиристорного преобразователя / Л.И. Цытович, А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2009. Вып.11. №15 (148). С. 45-50.
- Crane L., Katzel J. Coping with industrial control system noise // *Plant Engineering*. 1997. №11, Pp. 89-91.
- Дудкин М.М., Цытович Л.И. Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями: монография // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 362 с.
- Adaptive interval and code bidecimal timing mechanism with watching fixing of points of natural commutation of circuit voltage / L.I. Tsytoich, M.M. Dudkin, O.G. Brylina, A.V. Tygaev // *European Science and Technology: materials of the III international research and practice conference / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2012. Vol.I. October 30th–31st. Pp. 276-281.*
- Колоколкин А.М., Смирнов А.Н. Функционально полная асинхронно-синхронная цифровая система управле-

ния вентильным преобразователем // *Электротехника*. 2014. №1. С. 31-34

- Осипов О.И., Усынин Ю.С. Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока. М.: Энергия, 1979. 80 с.
- Method and device of synchronization for determination of squirrel cage asynchronous motors parameters / S. Enache, A. Campeanu, I. Vlad, M.-A. Enache // *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2013 8th International Symposium, 2013, pp. 1-4.
- Чернов Е.А., Кузьмин В.П. Комплексные электроприводы станков с ЧПУ: справочное пособие. Горький: Волго-вятское книжное издательство, 1989. 320 с.
- Темников Ф.Е., Славинский В.Е. Математические разветвляющие системы. М.: Энергия, 1970. 120 с.
- Цытович Л.И., Брылина О.Г. Многозонные интегрирующие системы управления каскадами «вентильный преобразователь – исполнительный механизм» для объектов с параллельными каналами регулирования // *Практическая силовая электроника*. №36. –М.: Изд-во ЗАО «ММП-Ирбис», 2009. – С. 23-30.
- Интегрирующие разветвляющие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина, Н.А. Логинова // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2010. № 10. С. 38–43.
- Цытович Л.И., Брылина О.Г. О динамике многозонного интегрирующего регулятора с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон // *Электротехника*. 2014. №7. С. 17-25.
- Терещина О.Г. Фильтры с дискретно перестраиваемыми в функции сигнала управления динамическими характеристиками на основе многозонного интегрирующего разветвляющего преобразователя // *Труды 14 международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока»*. Екатеринбург, 2007. С. 51-54.
- Широтно-импульсный интегрирующий разветвляющий преобразователь с контуром амплитудной коррекции динамических характеристик / Л.И. Цытович, В.Г. Маурер, П.Л. Цытович // *Приборы и техника эксперимента*. М.: РАН, 1997. №3. С. 89-93.
- Цытович Л.И., Качалов А.В. Интегрирующая интервал-кодовая синхронизация реверсивных тиристорных преобразователей // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2010. Вып. 13. №14 (190). С. 36-39.
- Сидоров С.Н., Миронов Д.С. Реверсивный тиристорный преобразователь без уравнивающих реакторов: пат. RU 2444112 26.11.2010.
- Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // *Электротехника*. 2013. №3. С. 37-43.

INFORMATION IN ENGLISH

THE NOISE IMMUNITY SYNCHRONIZATION OF THE VALVE CONVERTERS

Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M., Brylina O.G., Tygaev A.V.

The synchronization devices for the network controlled power valve converters, based on integrate sweep converters with frequency-width-pulse modulation (SC) were reviewed.

A block diagrams of the system, a time diagrams of the signals and synchronization conditions of SC switching frequency by the external bipolar rectangular and harmonic signals were shown. As an example of a three phase reverse thyristor converter of DC the function block diagrams of cross and interval-code synchronizations was shown.

A functional diagram of SC, the main calculated

proportions and the recommendations for choosing the parameters were given.

This article may be interesting for engineers and technical employees, who work with the design, debugging and exploitation the power converter equipment.

Keywords: synchronization device, valve converter, sweeping converter, interval-code synchronization, cross synchronization, phase shifting device, decoder, pulse distributor.

REFERENCES

1. Osipov O.I., Usynin Yu.S. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomatizirovannykh elektropriwodov* [Technical diagnostics of automated electric drives]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 160 p.
2. Brinkis K., Staltmanis A. The automated control of a power system. *Baltic electrical engineering review*. 1997. No.2(6). Pp. 39-44.
3. Kachalov A.V., Tsyitovich L.I., Dudkin M.M. *Integriruyushchie ustroystva sinhronizatsii dlya sistem impulsno-fazovogo upravleniya ventilnyimi preobrazovatelyami* [Integrating Synchronizers for Gated Converters Pulse-Phase Control Circuits]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Applied Power Electronics], 2010, no. 1(37)/2010, pp. 42-51.
4. Tsyitovich L.I., Kachalov A.V., Dudkin M.M., Rahmatulin R.M. *Adaptivnaya sistema sinhronizatsii trekhfaznogo mostovogo reversivnogo tiristornogo preobrazovatelya* [Adaptive synchronization system of three-phase bridge reversible thyristor converter]. *Vestnik JuUrGU. Seriya «Jenergetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2009, vol. 11, no. 15 (148). pp. 45-50.
5. Crane L., Katzel J. Coping with industrial control system noise // *Plant Engineering*. 1997. №11, Pp. 89-91.
6. Dudkin M.M., Tsyitovich L.I. *Elementy informatsionnoy elektroniki sistem upravleniya ventilnyimi preobrazovatelyami* [Elements of information Electronics control systems of valve converters]. 2011, 362 p.
7. Tsyitovich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Tugaev A.V. Adaptive interval and code bidecimal timing mechanism with watching fixing of points of natural commutation of circuit voltage. *European Science and Technology: materials of the III international research and practice conference*. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2012. Vol.I. October 30th–31st. Pp. 276-281.
8. Kolokolkin A.M., Smirnov A.N. *Funkcional'no-polnaya asinhronno-sinhronnaya cifrovaya sistema upravleniya ventil'nykh preobrazovatelem* [A functionally complete asynchronous-synchronous digital control system for a valve converter.] *Jeletrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2014, vol. 85, no. 1, pp. 29-33.
9. Osipov O.I., Usynin Yu.S. *Promyshlennyye pomehi i sposoby ih podavleniya v ventilnykh elektroprivodakh postoyannogo toka* [Industrial interference and methods for their suppression in DC rectifier drives]. Moscow: Energija, 1979, 80 p.
10. Enache S., Campeanu A., Vlad I., Enache M.-A. Method and device of synchronization for determination of squirrel cage asynchronous motors parameters. *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2013. 8th International Symposium, 2013, pp. 1-4.
11. Chernov E.A., Kuzmin V.P. *Kompleknyie elektroprirodyi stankov s CHPU* [Unitized electric drives for CNC machines]. Gorkiy, 1989. 320 p.
12. Temnikov F.E., Slavinskiy V.E. *Matematicheskie razvertyvayushchie sistemy* [Mathematical deploy systems]. Moscow: Energiya, 1970, 120 p.
13. Tsyitovich L.I., Brylina O.G. *Mnogozonnyie integriruyushchie sistemy upravleniya kaskadami «ventilnyy preobrazovatel – ispolnitelnyy mekhanizm» dlya obyektov s parallelnymi kanalami regulirovaniya* [Multi-zone integrated control system for control the cascades "converter valve - actuator" for objects with parallel channel regulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2009, no.36/2009, pp. 23-30.
14. Tsyitovich L.I., Dudkin M.M., Tereschina O.G., Loginova N.A. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli s povyishennoy temperaturnoy stabilnostyu harakteristik* [Integrating deploying inverters with high temperature stability characteristics]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2010, no. 10, pp. 38-43.
15. Tsyitovich L.I., Brylina O.G. *O dinamike mnogozonnoego integriruyushhego regulatora s chastotno-nulevym sopryazheniem moduljacionnykh zon* [Dynamics of a multizone integrating regulator with frequency-zero junction of modulation zones]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering]. 2014, vol. 85, no. 7, pp. 434-442.
16. Tereschina O.G. *Filtry s diskretno perestraivaemyimi v funktsii signala upravleniya dinamicheskimi harakteristikami na osnove mnogozonnoego integriruyushhego razvertyvayushchego preobrazovatelya* [Filters with discretely reconfigurable in function of a control signal of the dynamic characteristics on the basis of the multizone integrating sweep converter]. *Trudy 14 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Jeletroprirodyi peremennogo toka»* [Proceeding of the 14 international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"]. Ekaterinburg, 2007, pp. 51-54.
17. Tsyitovich L.I., Maurer V.G., Tsyitovich P.L. *Shirotno-impul'snyy integriruyushchiy razvertyvayushchiy preobrazovatel s konturom amplitudnoy korrektsii dinamicheskikh harakteristik* [Width-pulse integrating scanning converter circuit amplitude correction of dynamic characteristics]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1997, no. 3, pp. 89-93.
18. Tsyitovich L.I., Kachalov A.V. *Integriruyushchaya intervalo-kodovaya sinhronizatsiya reversivnykh tiristornykh preobrazovateley* [Integrating interval-code synchronization of reversible thyristor converters]. *Vestnik Juzhno-ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"]. 2010, vol. 13, no. 14 (190). pp. 36-39.
19. Sidorov S.N., Mironov D.S. *Reversivnyy tiristornyy preobrazovatel' bez uravnitel'nykh reaktorov* [Reversible thyristor converter without paralleling reactors]. Patent RUS 2444112 26.11.2010.
20. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Shishkov A.N. *Ventil'nyy jeletropriwod s sinhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vozbuзhdeniya* [Electric drive with a field-regulated reluctance machine]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering]. 2013, vol. 84, no. 3, pp. 149-154.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Отмечается, что большинство отечественных прокатных станов оснащено тиристорными электроприводами постоянного тока с двухзонным регулированием скорости (ДЗРС). Дается перечень научно-технических разработок, обеспечивающих снижение потребления реактивной мощности за счет ограничения запаса выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя в установившемся и динамических режимах. Промышленное внедрение тиристорных электроприводов, оснащенных разработанными системами ДЗРС, потребовало проведения теоретических и экспериментальных исследований их энергетических показателей. Проводится исследование разработанной комбинированной системы ДЗРС, внедренной в опытно-промышленную эксплуатацию на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Рассматриваются энергетические характеристики электропривода одной из клеток стана при работе существующей и внедряемой систем ДЗРС. Представлены результаты осциллографирования реактивной мощности на секции шин 10 кВ до и после проведения мероприятий по снижению ее потребления, включающих внедрение разработанной системы и снижение вторичного напряжения преобразовательных трансформаторов. Подтверждено снижение потребления реактивной мощности во всем диапазоне изменения тока нагрузки электропривода. Дается оценка технико-экономической эффективности внедрения исследуемой системы ДЗРС во всех электроприводах непрерывной группы стана 2000. Расчетное снижение потерь электрической энергии при прокатке полос «среднего» сортамента составляет не менее 7%. Отмечается, что сокращение потребления реактивной мощности достигается без применения компенсирующих устройств за счет совершенствования систем управления электроприводов, т.е. практически без капитальных затрат.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, тиристорный электропривод, энергетические показатели, реактивная мощность, система двухзонного регулирования скорости, разработка, внедрение, экспериментальные исследования, технико-экономическая эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, большинство отечественных широкополосных станов горячей прокатки оснащено тиристорными электроприводами (ЭП) постоянного тока с двухзонным регулированием скорости. Анализ энергетических показателей таких электроприводов показывает, что до 30% потерь электрической энергии связаны с потреблением реактивной мощности, вызванным фазовым регулированием выпрямленного напряжения [1, 2]. К этим электроприводам предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия и надежности при отработке ударного приложения нагрузки, возникающего при захвате металла валками, а также в режиме разгона под нагрузкой при прокатке с ускорением. Данные требования выполняются, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), будут обеспечены в названных динамических режимах. Дополнительное увеличение запаса способствует повышению надежности ЭП, однако приводит к ухудшению энергетических показателей за счет увеличения потребления реактивной мощности, зависящей от степени регулирования выпрямленной ЭДС (выпрямленного напряжения) [3].

Для преодоления указанных противоречий в [4] обоснована концепция энергосбережения, основанная на рациональном перераспределении запаса выпрямленной ЭДС ТП в установившемся и динамических режимах. С целью реализации этой концепции разработан комплекс тиристорных электроприводов с ДЗРС с улучшенными энергетическими показателями. К ним относятся: ЭП с автоматическим поддержанием запаса выпрямленной ЭДС [5, 6], с ее ограничением в режиме ударного приложения нагрузки [7, 8], с постоянством выпрямленной ЭДС в течение цикла прокатки [9], с ее ограничением в начальный момент ускорения под нагрузкой [10]. Разработана комбинированная система ДЗРС, объединяющая преимущества перечисленных

технических решений [11]. В работах [12, 13] даны рекомендации по промышленному применению этих разработок. Также выполнен анализ их динамических показателей методами математического моделирования [14–16] и экспериментальным путем на действующих прокатных станах [17].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве мероприятий по уменьшению потребления реактивной мощности в чистовой группе стана 2000 ОАО «ММК» выполнены:

- внедрение разработанной комбинированной системы двухзонного регулирования скорости с автоматическим регулированием задания выпрямленной ЭДС ТП в динамических режимах [11];
- переключение отпаяк преобразовательных трансформаторов, обеспечивающее снижение вторичного напряжения на 5%;
- повышение задания (уставок) ЭДС двигателей по клетям до номинального уровня (на 8–12%).

Система выполнена на базе ячеек, входящих в комплект тиристорных преобразователей, схема подключения функциональных блоков представлена на рис. 1.

В табл. 1 представлены результаты расчета энергетических показателей ЭП 10-й клетки до (строка 1) и после (строка 2) проведения вышеуказанных мероприятий. Реактивная мощность Q посчитана по зависимости

$$Q = I_d \sqrt{E_{d0}^2 - E_d^2}, \quad (1)$$

где I_d – выпрямленный ток нагрузки; E_{d0} – максимальная выпрямленная ЭДС ТП при нулевом угле управления; E_d – текущее значение выпрямленной ЭДС ТП.

Потери мощности вычислялись по формуле [18]

$$\Delta P_Q = K_{ип} Q, \quad (2)$$

где $K_{ип}$ – коэффициент изменения потерь (кВт/квар), задается предприятию энергосистемой или принимается по справочным данным.

Величина $K_{ип}$ изменяется от 0,02 до 0,25 кВт/квар и зависит от удаленности потребителя от источника питания. Наименьшее значение коэффициента принимается для трансформаторов, присоединенных непосредственно к шинам станции. В соответствии с рекомендациями [18] величина $K_{ип}$ при расчетах принята равной 0,12 кВт/квар. Годовые потери электрической энергии, связанные с потреблением реактивной мощности, посчитаны по зависимости

$$W_{Qi} = K_{вкл} T_{год} P_{Qi}, \quad (3)$$

где $K_{вкл} = T_{ц}/T_{нагр}$ – коэффициент включения; $T_{ц}$ – время цикла прокатки; $T_{нагр}$ – время работы под нагрузкой за цикл; $T_{год}$ – среднегодовое число часов работы под нагрузкой. При расчетах принято $K_{вкл} = 0,9$;

$$T_{год} = 7000 \text{ ч.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Для оценки достоверности расчетных данных выполнено осциллографирование реактивной мощности электропривода 10-й клетки при прокатке полосы, параметры которой приняты при расчетах (см. табл. 1). Осциллограммы представлены на рис. 2, там же показаны осциллограммы токов ЭП 8-й, 10-й клеток и напряжения секции 10 кВ, к которой подключены данные электроприводы. Кривые на рис. 2, а получены до проведения мероприятий по снижению потребления реактивной мощности, кривые на рис. 2, б – после внедрения системы ДЗРС и снижения вторичного напряжения на 5%. На осциллограммах показаны интегральные значения реактивной мощности за цикл прокатки $Q_{ср1}$, $Q_{ср2}$.

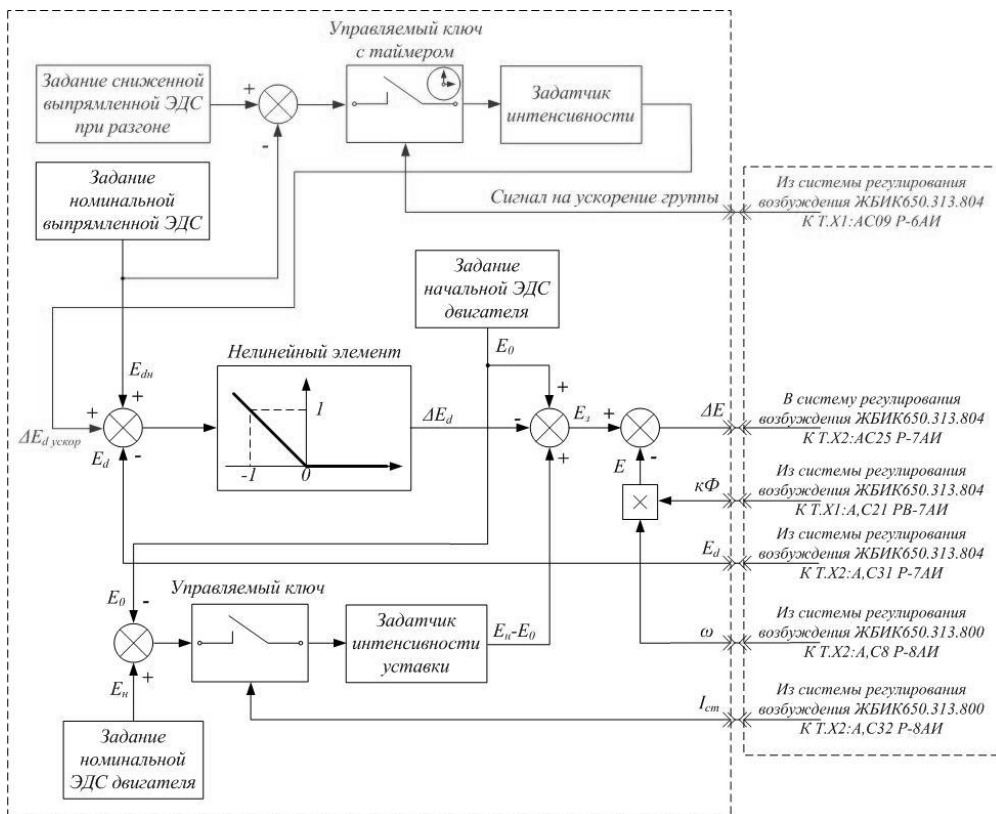


Рис. 1. Схема подключений блоков внедряемой системы ДЗРС

Таблица 1

Энергетические показатели электропривода 10-й клетки

Тип системы	Параметры электропривода					Энергетические показатели			
	E_n , В	I_d , А	E_d , В	E_{d0} , В	C_p	Q , МВАр	$P_{Q10кл}$, кВт	$W_{Qгод}$, млн кВт·ч	$\mathcal{E}_{год}$, млн кВт·ч
Действующая (расчетные значения)	902	4240	946	1215	0,78	3,23	388	2,44	–
Разработанная (расчетные значения)	902	4240	946	1150	0,82	2,77	332	2,09	0,35
Действующая (экспериментальные значения)	860	4240	900	1215	0,74	3,47	416	2,62	–
Разработанная (экспериментальные значения)	860	4240	900	1150	0,78	3,03	364	2,29	0,33

Расхождение теоретических и экспериментальных данных, представленных в **табл. 1**, для действующей системы составляет 7,4% в сторону увеличения (3,23 и 3,47 Мвар соответственно), для разработанной – 9,4% (2,77 и 3,03 Мвар). Такое различие объясняется тем, что при расчетах ток нагрузки принимался постоянным, в то время как в ходе экспериментов определялись интегральные (усредненные) значения, которые выше, т.к. при прокатке с ускорением ток возрастает по сравнению с расчетной величиной.

ОБРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На **рис. 3** приведены кривые реактивной мощности Q^* и Q^* , потребляемой электроприводом 10-й клетки, рассчитанные по выражению (1) (обозначения со штрихом соответствуют разработанной системе). Кривые построены в относительных единицах в функции тока нагрузки i . Величина ЭДС двигателя при расчетах принималась равной своему номинальному значению; E_{d0} рассчитывалось из условия снижения подводимого напряжения на 5%. На этом же рисунке приведены значения реактивной мощности, полученные в результате ее осциллографирования при прокатке полос более 90 профилей различного сортамента толщиной от 1,8 до 6 мм. Прокатка 40 полос была проведена при работе существующей системы (значения реактивной мощности Q^* показаны крестиками), прокатка остальных полос – после внедрения мероприятий по снижению потребления реактивной мощности (значения Q^* показаны точками).

Выполнена оценка соответствия (адекватности) результатов эксперимента и данных, полученных расчетным путем [20]. Показано, что с доверительной вероятностью 95% уменьшение потребления реактивной мощности связано с внедрением разработанной системы и проведением мероприятий по снижению запаса ТП по напряжению. Следовательно, полученные экспериментальные результаты с достаточной точностью соответствуют ожидаемым теоретическим.

РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В **табл. 2** представлены результаты расчета потерь электрической энергии для электроприводов всех клеток (№7–13) чистовой группы стана. Расчеты выполнены по тем же зависимостям (1) – (3), что и для ЭП 10-й клетки (см **табл. 1**), но для другого прокатываемого профиля [19, 21].

Снижение потерь мощности активного характера, вызванных потреблением реактивной составляющей (предпоследняя строка таблицы), вычислялось как разность

$$\Delta P_{Qi} = (P_{Qi} - P'_{Qi}).$$

Суммарные потери мощности при работе действующей и разработанной систем:

$$P_{Q\Sigma} = \sum_{i=7}^{13} P_{Qi} = 6411,6 \text{ кВт};$$

$$P'_{Q\Sigma} = \sum_{i=7}^{13} P'_{Qi} = 5952 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{Q\Sigma} = P_{Q\Sigma} - P'_{Q\Sigma} = 459,6 \text{ кВт}.$$

Потери электрической энергии:

$$W_Q = K_{\text{вкл}} T_{\text{год}} \Delta P_{Q\Sigma} = 40,4 \text{ млн кВт ч/год};$$

$$W'_Q = K_{\text{вкл}} T_{\text{год}} \Delta P'_{Q\Sigma} = 37,5 \text{ млн кВт ч/год}.$$

Годовая экономия электрической энергии от внедрения мероприятий по уменьшению потребления реактивной составляющей

$$\Delta W_Q = W_Q - W'_Q = 2,9 \text{ млн кВт ч/год}$$

$$\text{или } \Delta W_Q \% = 7,2\%.$$

Таким образом, расчетное снижение потерь мощности и электроэнергии при прокатке полосы исследуемого профиля составляет около 7%.

Таблица 2

Результаты расчета энергетических показателей электроприводов чистовой группы

Параметр	Значения по клетям чистовой группы стана 2000						
	7	8	9	10	11	12	13
Тип двигателя	2МП14200 50У4		2МП14200 125У4		2МП14200 200У3		2МП11200 300У3
Номинальная мощность, кВт	2х6300	2х6300	2х7100	2х7100	2х7100	2х7100	2х7100
$I_{di}, \text{ А}$	8188	9484	11398	11344	10412	9930	9406
I_{di}/I_{dHH}	0,51	0,58	0,71	0,73	0,7	0,72	0,78
$I'_{di}, \text{ А}$	8188	9484	11398	11344	10412	9930	9406
$Q_i, \text{ МВАр}$	6,24	7,22	8,68	8,64	7,93	7,56	7,16
$Q'_i, \text{ МВАр}$	5,79	6,7	8,06	8,02	7,36	7,02	6,65
$P_{Qi}, \text{ кВт}$	748,8	866,4	1041,6	1036,8	951,6	907,2	859,2
$P'_{Qi}, \text{ кВт}$	694,8	804	967,2	962,4	883,2	842,4	798
$P_{Qi}, \text{ кВт}$	54	62,4	74,4	74,4	68,4	64,8	61,2
$\Delta P_{Qi}, \%$	7,2	7,4	7,14	7,2	7,2	7,14	7,12

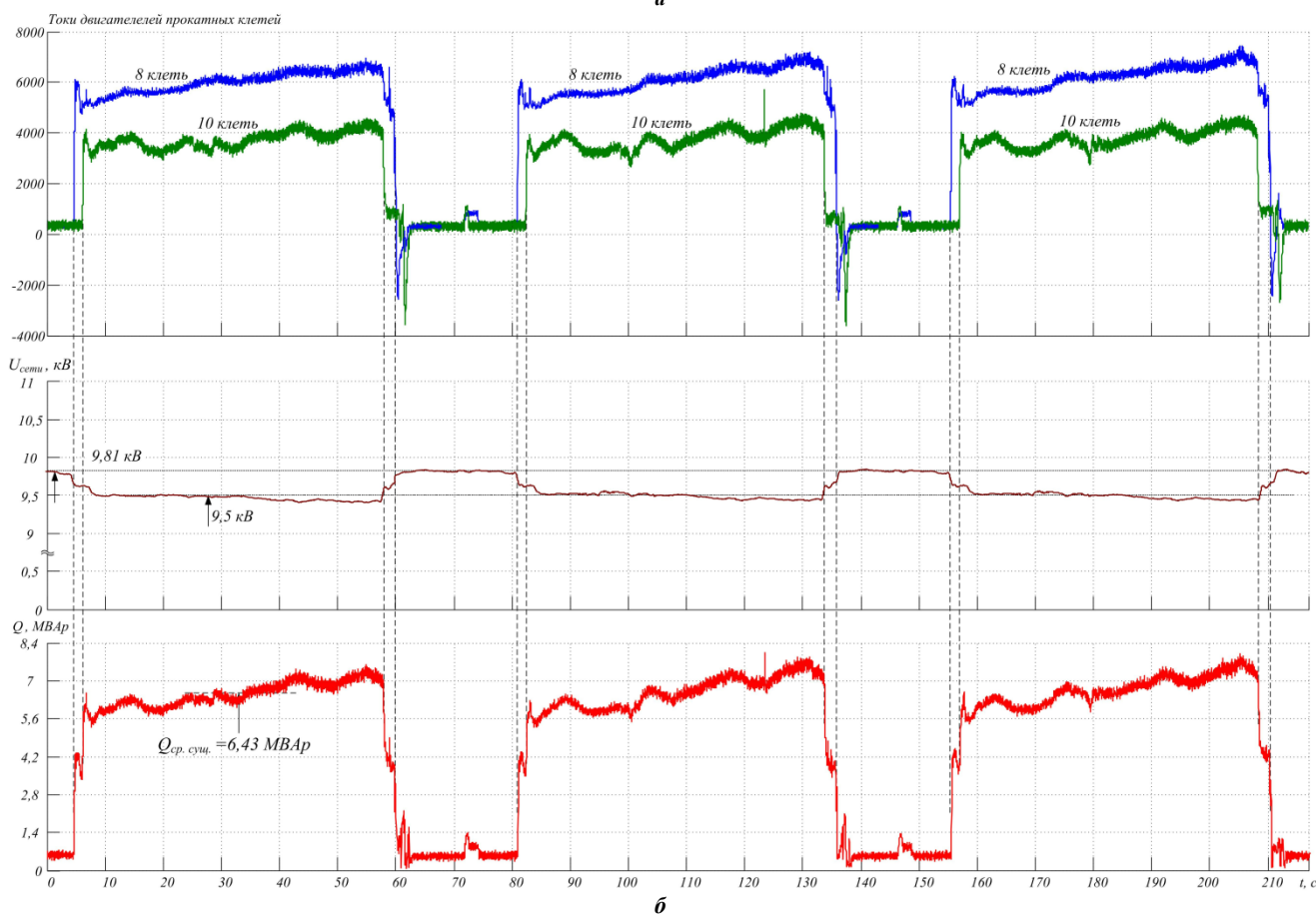
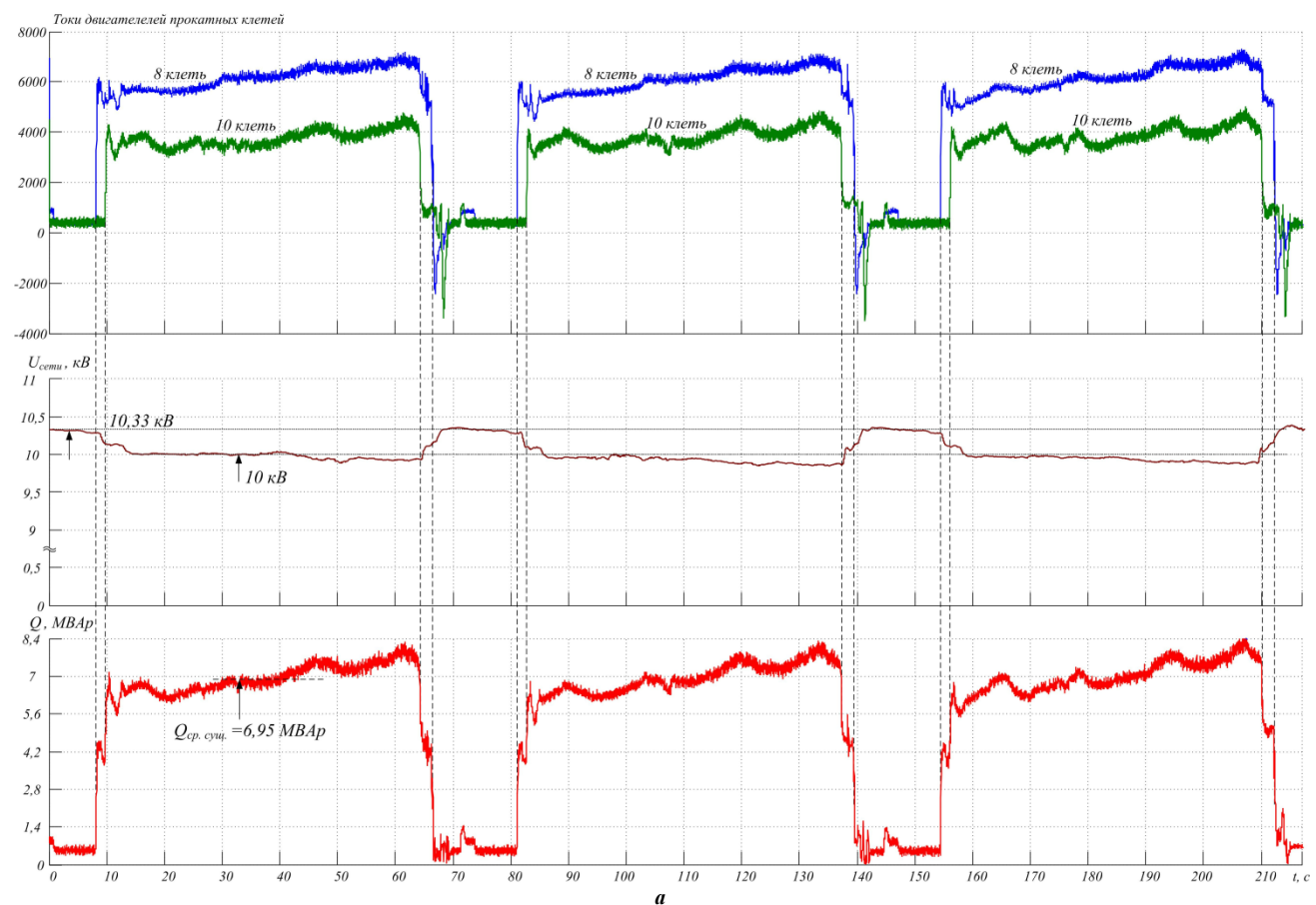


Рис. 2. Результаты экспериментальной оценки реактивной мощности:
а – до внедрения; б – после внедрения предложенных мероприятий

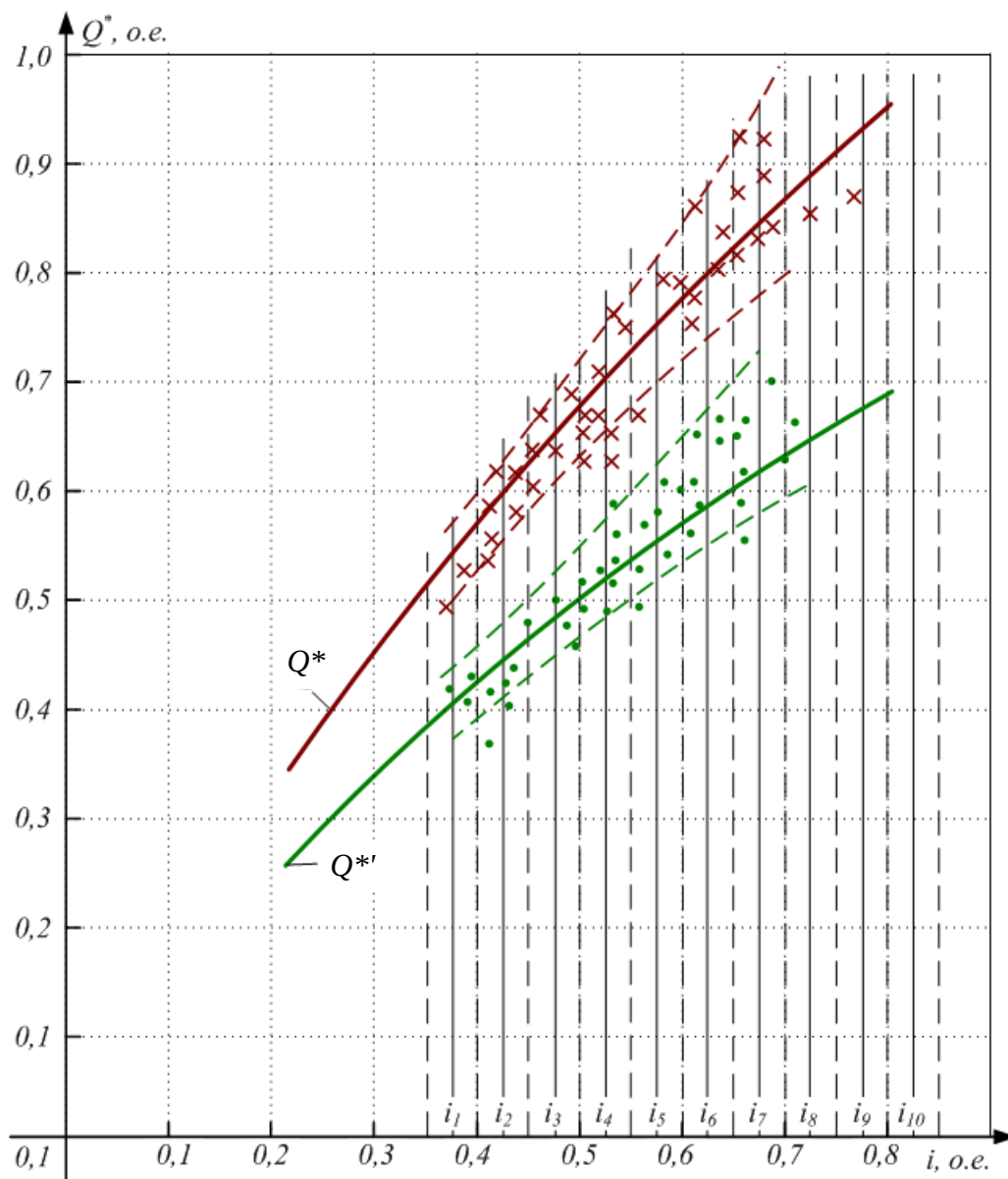


Рис. 3. Потребление реактивной мощности до и после внедрения мероприятий по снижению ее потребления

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В четвертой строке табл. 2 представлены относительные значения токов нагрузки I_{di} по клетям чистой группы. За базисные приняты номинальные токи двигателей. Расчетные токи нагрузки изменяются от $0,5 I_{дн}$ – седьмая клеть до $0,78 I_{дн}$ – тринадцатая клеть. Следовательно, исследуемый профиль с точки зрения нагрузки электроприводов относится к «средним». Это позволяет сделать вывод, что при существующем широком сортаменте стана реальная экономия электрической энергии значительно превысит представленное расчетное значение.

При этом экономический эффект достигается за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами. Для вновь проектируемых ЭП улучшение энергетических показателей при внедрении разработанных систем ДЗРС может быть обеспечено за счет рационального выбора вторичного напряжения преобразовательного трансформатора. По сравнению с напряжением, принимаемым в известных электроприводах подобного класса, его рекомендуется снизить на

10–15%. Это позволит уменьшить потребление реактивной мощности на 7–10%, т.е. практически без затрат добиться снижения потерь электрической энергии. Для главных ЭП эксплуатируемых станов эффект может быть обеспечен за счет переключения отпаяк вторичных обмоток трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внедрение на стане 2000 ОАО «ММК» разработанной комбинированной системы ДЗРС позволяет снизить запас выпрямленной ЭДС ТП на величину максимального динамического превышения ЭДС над установившимся значением (при максимальном токе нагрузки электропривода – на 12–16%) [19]. Предложенные практические мероприятия по ограничению запаса выпрямленной ЭДС ТП электроприводов стана предусматривают снижение вторичного напряжения на 5% и повышение уставки ЭДС в установившемся режиме работы под нагрузкой до номинального уровня.

В результате статистической обработки экспериментальных данных, полученных при прокатке полос более 90 профилей различного сортамента, дано под-

тверждение, что уменьшение потребления реактивной мощности обеспечено внедрением разработанной системы и проведением мероприятий по снижению запаса ТП по напряжению.

При расчете энергетических характеристик электроприводов всех клетей чистовой группы при прокатке полос «среднего» сортамента определено, что внедрение разработанной комбинированной системы ДЗРС в комплексе с рекомендуемыми мероприятиями обеспечивает уменьшение потерь электрической энергии на 7%.

В процессе длительной эксплуатации доказано, что внедрение разработанной системы ДЗРС обеспечивает:

- уменьшение потерь электрической энергии в среднем на 2,9 млн. кВт·ч/год;
- улучшение условий коммутации двигателей чистовой группы при работе в режиме ослабления поля за счет ограничения межламельного напряжения в динамических режимах [22];
- обеспечение безопасного инвертирования при снижении напряжения сети [23–25];
- обеспечение технической возможности прокатки полос «тяжелого» сортамента [26–30].

Это позволяет рекомендовать расширенное внедрение разработанных технических решений на действующих прокатных станах, а также на других промышленных агрегатах, оснащенных тиристорными электроприводами с двухзонным регулированием скорости.

Работа выполняется в рамках гранта Президента РФ (МД-3395.2015.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмшин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы прокатных станов: монография. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 180 с.
2. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 35–39.
3. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, А.А. Шеметова, А.С. Евдокимов, А.А. Лукин, А.Ю. Андрушин, П.В. Шилиев, В.В. Головин // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 5–11.
4. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин, А.В. Осипов // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 260–264.
5. Пат. 2095931 РФ, МКП6 Н 02 Р 5/06. Способ управления электроприводом постоянного тока / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, О.И. Карандаева, А.С. Чуманский. Оpubл. 10.11.1997. Бюл. №31.
6. Карандаев А.С., Радионов А.А., Головин В.В. Система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 40–46.
7. А.с. 892634 СССР, МКИ Н 02 Р 5/06. Устройство для управления возбуждением электродвигателя постоянного тока / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, В.И. Косматов, И.А. Селиванов. Оpubл. 23.12.1981. Бюл. № 3.
8. Федоров А.А., Корнилов Г.П., Карандаев А.С. Улучшение энергетических показателей электропривода в системе двухзонного регулирования частоты вращения // Изв. вузов СССР. Энергетика. 1983. № 9. С. 29–33.
9. Пат. 2154892 РФ, МПК Н 02 Р 5/06. Способ управления потоком возбуждения электродвигателя постоянного тока / Е.В. Карпов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, И.Ю. Кузнецов, М.Ю. Петушков. Оpubл. 20.08.2000 №23.
10. Патент 2456741 РФ, МПК7 Н 02 Р 7/28. Способ управления потоком возбуждения электродвигателя постоянного тока / Ю.П. Журавлев, В.В. Головин, П.В. Шилиев, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // БИПМ №20. 2012. С. 460.
11. Патент 2457611 РФ, МПК7 Н 02 Р 7/06. Способ управления потоком возбуждения электродвигателя постоянного тока в системе двухзонного регулирования / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, А.А. Лукин, Ю.П. Журавлев, П.В. Шилиев, В.В. Головин // БИПМ №21. 2012. С. 394.
12. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 360 с.
13. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 3–15.
14. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. №3. С. 47–53.
15. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шилиев // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 12–20.
16. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / Храмшин В.Р., Андрушин И.Ю., Гостев А.Н., Карандаев А.С. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12–21.
17. Карандаев А.С. 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 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика», 2010. №14. С. 67–72.
18. Федоров А.А., Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергия, 1981. 360 с.
19. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 40–45.
20. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шилиев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3–2. С. 34–40.
21. Исследование условий коммутации двигателей электроприводов широкополосного стана горячей прокатки / Ю.В. Мерзляков, Г.Г. Толмачев, А.С. Карандаев, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.И. Хлыстов // Известия ТулГУ. Тех-

ческие науки. Вып. 3: в 5 ч. 2010. Ч. 3. С. 89–96.

22. Храмшин В.Р. Повышение безопасности режима инвертирования тиристорного электропривода при прокатке полос расширенного сортамента // *Электротехника*. 2013. №2 С. 52–56.

23. Пат. 121669 РФ, МПК7 Н 02 Р 7/06. Устройство двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин // *БИМП*. №30. 2012. С. 112.

24. Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2012. №6. С. 100–104.

25. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слывов стана 2800 // *Приводная техника*. 1999. № 1–2. С. 21–24.

26. Определение энергосиловых параметров процессов

обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров; Магнитогорск, 2000. Деп. в ВИНТИ 20.04.2000.

27. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андришин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2011. № 4. С. 31–35.

28. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана. / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андришин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2013. № 1. С. 98–103.

29. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клетей черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2011. № 34 (251). С. 35–41.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION THE ENERGY-EFFICIENT THYRISTOR ELECTRIC DRIVES OF ROLLING MILLS

Khramshin V.R., Odintsov K.E., Shurygina G.V., Petuhova O.I., Shohina G.V., Kosmatov A.K.

The majority of domestic rolling mills are framed by DC thyristor electric drives with a two-zone speed control (TZSC). The list of a scientific and technical developments, which are guarantee the decrease of reactive power consumption at the cost of restriction of capacity of thyristor converter rectified electromotive force in a steady and dynamic modes, was reviewed. An industrial introduction of thyristor electric drives, which are equipped by developed TZSC systems, requires to execution the theoretical and experimental researches of their energetic characteristics. The research of developed combined TZSC system, which is implemented into an experimental-industrial exploitation on the mill 2000 OJSC “Magnitogorsk Iron & Steel Works”, (OJSC “MMK”) was carried out. The energetic characteristics of electric drive one of the mill stand in a working process of existed and implemented TZSC systems were reviewed. The results of reactive power oscillographic testing on the section of 10 kV bus before and after of decrease power arrangement, including the implementation of developed system and decreasing the secondary voltage of rectifier transformers, was shown. The decrease of reactive power consumption in the whole range of electric drive load current changing was confirmed. The assessment of technical and economic efficiency of implementation the examined TZCS system in a whole electric drives of repeating mill 2000 group. Estimated decrease of electric energy loss in process of a “average” range sheet milling upwards of 7%. It is register, that decreasing of reactive power consumption is achieved without appliance of compensating devices due to a improving the electric drive control systems, i.e. almost without capital charges.

Keywords: wide-strip rolling mill of hot reducing, thyristor electric drive, energetics characteristics, reactive power, two-zone speed control system, development, implementation, experimental research, technical and economical efficiency.

REFERENCES

1. Hramshin V.R. *Energoberegayushchie tiristornye elektroprivody prokatnyh stanov: monografiya* [Energy-saving thyristor mills]. *Magnitogorskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. G.I. Nosova (Magnitogorsk)* [Federal public budgetary educational institution of higher education “Magnitogorsk state technical university of G.I.Nosov”], 2013, 179 p.
2. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R.

Energoberegayushchie tiristornye elektroprivody s avtomaticheskim izmeneniem koordinaty, reguliruemoy po cepi vzbuzhdeniya [Energy-saving thyristor electric drives with automatic coordinate variation, which is controlled by the circuit condenser]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 35–39.

3. Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Hramshin V.R., SHemetova A.A., Evdokimov A.S., Lukin A.A., Andriyushin A.YU., SHilyaev P.V., Golovin V.V., Titov A.A., Mostovoj S.E., Petryakov S.A. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannyh elektroprivodov i diagnostika silovogo elektrooborudovaniya* [Improving the automated electric drives and diagnostics of power electrical equipment]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2009, no. 1, pp.5–11.

4. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V., Osipov A.V. *Koncepciya postroeniya elektroprivodov prokatnyh stanov s dvuhzonnyim regulirovaniem skorosti i uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami* [Conception of construction an rolling mill electric drives with two-zone speed control and improved energetic characteristics]. *Trudy IV Mezhdunarodnoj (XV Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu «Avtomatizirovannyj elektroprivod v XXI veke: puti razvitiya» (AEP-2004, Magnitogorsk)* [Proceedings of IV International (XV All-Russian) conference of automated electric drive “Automated electric drive in XXI century: paths of development” (AED-2004, Magnitogorsk)], 2004, vol. 2, pp. 260–264.

5. Selivanov I.A., Karandaev A.S., Karandaeva O.I., Chumanskij A.S. *Sposob upravleniya elektroprivodom postoyannogo toka* [A method of controlling the DC electric drive]. Patent no. 2095931, MPC H 02 P 5/06. Published 10.11.1997, Bulletin no. 31.

6. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V. *Sistema dvuhzonnogo zavisimogo regulirovaniya skorosti v funkcii vypryamlennoj eds tiristornogo preobrazovatelya* [System of two-zone dependent speed regulation in the function of rectified electromotive force of the thyristor converter]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2004, no. 2, pp. 40–46.

7. Selivanov I.A., Kosmatov V.I., Kornilov G.P., Karandaev A.S. *Ustrojstvo dlya upravleniya vzbuzhdeniem*

elektroprivodnaya postoyannogo toka [Device for controlling the excitation DC electric motor]. Certificate of authorship no. 892634, USSR, MKI H 02 P 5/06. Published 23.12.1981, bulletin no. 3.

8. Fedorov A.A., Kornilov G.P., Karandaev A.S. *Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej elektropivoda v sisteme dvuhzonnogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya* [Improvement of electric drive energetic characteristics in a system of two-zone rotating frequency control]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij SSSR. Energetika* [Proceedings of higher educational institutions of the USSR. Energy], 1983, no. 9, pp. 29-33.

9. Karpov E.V., Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Kuznecov I.Yu., Petushkov M.Yu. *Sposob upravleniya potokom vzbuzhdeniya elektrodvigatelya postoyannogo toka* [A method of controlling the flow of DC motor excitation]. Patent no. 2154892, MPC H 02 P 5/06. Published 20.08.2000, bulletin no. 23.

10. Zhuravlev Yu.P., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R., Hramshin R.R. *Sposob upravleniya potokom vzbuzhdeniya elektrodvigatelya postoyannogo toka* [A method of controlling the flow of DC motor excitation]. Patent no. 2456741, MPC 7 H 02 P 7/28, 2012, BIMP no. 20, 460 p.

11. Karandaev A.S., Hramshin V.R., Hramshin R.R., Lukin A.A., Zhuravlev Yu.P., Shilyaev P.V., Golovin V.V. *Sposob upravleniya potokom vzbuzhdeniya elektrodvigatelya postoyannogo toka v sisteme dvuhzonnogo regulirovaniya* [A method of controlling the flow of DC motor excitation in a system of two-zone control]. Patent no. 2457611, MPC 7 H 02 P 7/06

12. Khamshin V.R. *Razrabotka elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of electrotechnical systems for continuous train of hot rolling mill in the process of product range expansion]: Dissertation for a D.Sc. degree in Engineering. Magnitogorsk. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 360 p.

13. Karandaev A.S. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh elektropivodov agregatov prokatnogo proizvodstva* [Improvement of automatic electric drives of rolling stands]. *Mashinostroenie* [Machine-building]. Network electronic scientific journal, 2014, no.1, pp. 3-15.

14. Karandaev A.S., Khamshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. *Matematicheskoe modelirovanie tiristornogo elektropivoda s pereklyuchayuscheysya strukturoi* [Mathematical modeling of thyristor electric drive with a flipper]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2010, no.3, pp. 47-53.

15. Karandaev A.S., Khamshin V.R., Andryushin I.Yu., Shilyaev, Golovin V.V. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem mezhkletjevogo promezhutka shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Mathematical modeling of interrelated electrical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no.1, pp. 12-20.

16. Khamshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. *Matematicheskaya model vzaimosvyazannykh elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy shirokopolosnogo stana* [Mathematical model of interrelated electrical systems of continuous train of wide strip rolling mill]. *Mashinostroenie* [Machine building]. Network electronic scientific journal, 2013, no.1, pp. 12-21.

17. Karandaev A.S., Khamshin V.R., Lukin A.A., Shurygina G.V., Golovin V.V. *Eksperimental'nye issledovaniya tiristornykh elektropivodov s dvuhzonnym regulirovaniem skorosti s uluchshennymi energeticheskimi harakteristikami* [Experimental researches of thyristor electric drives with two-zone speed control with improved energetic characteristics] *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state univer-

sity. Power engineering], 2010, no. 14, pp. 67-72.

18. Fedorov A.A., Risthejn E.M. *Elektrosnabzhenie promyshlennyyh predpriyatij* [Industrial power supply]. Moscow. Energiya, 1981, 360 p.

19. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R. *Otsenka effektivnosti primeneniya tiristornogo elektropivoda s avtomaticheskimi izmeneniyami koordinaty, reguliruemoy po cepi vzbuzhdeniya* [Performance evaluation of applying the thyristor electric drive with automatic coordinate variation, which is controlled by the circuit condenser]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 40-45.

20. Khamshin V.R. *Razrabotka elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of electrotechnical systems for continuous train of hot rolling mill in the process of product range expansion]. Dissertation for a D.Sc. degree in Engineering. Magnitogorsk. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 360 p.

21. Karandaev A.S., Khamshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. *Novye tehnichekie resheniya v elektropivodakh i sistemah regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov stanov goryachei prokatki* [New technical solutions in electric drives and control systems of manufacturing parameters of hot rolling mills]. Proceedings of TulGU. Technical sciences. Issue 3. Tula. Publishing center of TulGU, 2010, part 2, pp. 34-40.

22. Merzlyakov, Yu.V., Tolmachev G.G., Karandaev A.S., Galkin V.V., Golovin V.V., Hlystov A.I. *Issledovanie usloviy kommutatsii dvigatelej elektropivodov shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Research of conditions of electric drives motor commutation of wide-strip mill of hot rolling]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulGU. Technical sciences]. Issue 3: in a 5 parts, 2010, vol. 3, pp.89-96.

23. Hramshin V.R. *Povyshenie bezopasnosti rezhima invertirovaniya tiristornogo elektropivoda pri prokatke polos rasshirennogo sortamenta* [Improving the security mode of inverting the thyristor electric drive in the process of product range expansion]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no. 2, pp. 52-56.

24. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Hramshin R.R., Andryushin I.Yu. *Ustrojstvo dvuhzonnogo regulirovaniya skorosti dvigatelya postoyannogo toka* [Instrument of two-zone DC motor speed control]. Patent no. 121669, MPC 7 H 02 P 7/06, BIMP no. 30, 2012.

25. Hramshin V.R. *Razrabotka i vnedrenie avtomatizirovannykh elektropivodov i sistem regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Developing and implementation of automated electric drive and systems of controlling the process parameters of wide-strip hot rolling mill] *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Power University], 2012, no. 6, pp.100-104.

26. Baskov S.N., Karandaev A.S., Baskov S.N., Osipov O.I. *Energosilovye parametry pivodov i sistema profilirovannoi prokatki slyabov stana 2800* [Power parameters of electric drives and system of shape rolling of slabs at rolling mill 2800]. *Privodbaya tekhnika* [Driving equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21-24.

27. Radionov A.A., Usaty D.Yu., Radionov A.A., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. *Opredelenie energosilovykh parametrov protsessov obrabotki metallov davleniem kosvennykh metodom* [Calculation of power parameters of plastic metal working by indirect method]. Magnitogorsk, 2000, dep. in VINITI 20.04.2000, no. 1085-B00

28. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khamshin V.R. *Avtomaticheskaya korrektsiya skorostei elektropivodov kletei stana 2000 pri prokatke trubnoi zagotovki* [Automatic control of stand electric drive speed of 2000 rolling mill during tube stock

rolling]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 31-35.

29. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. *Soglasovanie skorostnykh rezhimov elektroprivodov kletei nepreryvnoi gruppy prokatnogo stana* [Coordination of rolling stand electric drive speed of continuous train of rolling mill]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISPU]. 2013, issue 1, pp. 98-103.

30. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. *Sovershenstvovanie algoritma soglasovaniya skorostei elektroprivodov kletei chernovoi gruppy stana goryachei prokatki* [Improvement of electric drives speed coordination algorithm for roughing train of hot rolling mill]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Power engineering]. Issue 16, 2011, no. 34(251), pp. 35-41.

Информация о других журналах издательства

«Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии, стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Издается с 2003 г.

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Базы данных ВИНТИ и РИНЦ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Индии, Италии, Польши, Южно-Африканской Республики, Казахстана.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВПО «МГТУ» www.magtu.ru (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);
- на сайте журнала www.vestnik.magtu.ru;
- на платформе eLIBRARY.

ФАЗИРОВКА ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ЗАЩИТАМИ ЛИНИЙ С ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

Целью нашей работы было получение метода дистанционной фазировки объектов энергетики путем передачи векторов в виде цифрового сигнала с помощью продольных дифференциальных защит линий, работающих по волоконно-оптическим линиям связи. Необходимость разработки данного метода была обусловлена тем, что на вновь вводимых объектах энергетики отсутствовало напряжение с которым бы происходило сравнение при фазировке. Разработанный нами метод был успешно опробован в лабораторных условиях, а также при запуске КРУЭ ОАО «ТАНЕКО» и ПГВ ОАО «Аммоний».

Ключевые слова: фазировка, дифференциальная защита линий (ДЗЛ), электрическая подстанция, волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), линия электропередачи (ЛЭП), синхронизация.

Известно, что электрическое оборудование трехфазного тока подлежит обязательной фазировке перед первым включением в сеть, а также после ремонта, во время которого мог быть нарушен порядок чередования фаз. Суть фазировки состоит в проверке того, что на выводы коммутационного аппарата, которые попарно принадлежат одной фазе, поданы одноименные напряжения и обозначения (расцветка) его выводов согласованы с обозначением фаз напряжений.

При этом фазировка энергообъектов выше 1 кВ, как правило, производится косвенными методами, при которых фазировка проверяется на вторичном напряжении трансформаторов напряжения, присоединенных к частям фазуемых электроустановок (рис. 1).

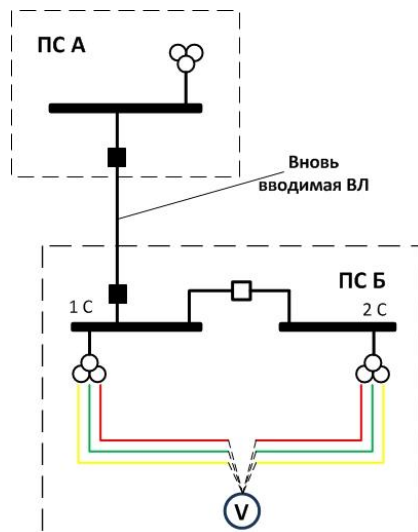


Рис. 1. Косвенная фазировка электроустановок

Фазировка включает три операции. Первая состоит в проверке и сравнении порядка чередования фаз вводимой в работу электроустановки и сети. Вторая - в проверке совпадения по фазе одноименных напряжений (отсутствия между ними углового сдвига). Третья - в проверке одноименности (расцветки) фаз, соединение которых предполагается выполнить с целью проверки правильности подсоединения токоведущих частей к коммутационному аппарату.

Зачастую возникает ситуация, при которой на первой операции определяется обратное чередование фаз, но для точного определения какие фазы поменяны

местами необходимо наличие эталонного напряжения, с которым бы происходило сравнение, для примера, на рис. 1 это может быть вторичное напряжение второй секции. Но мы сталкивались с проблемой, когда на вновь вводимых объектах электроэнергетики эталонного напряжения попросту нет, и вторая операция не могла быть осуществлена.

Тогда нами была разработана и успешно опробована схема, при которой эталонные вектора передавались с одного объекта на другой в виде цифрового сигнала по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) с помощью дифференциальных защит линий (ДЗЛ), которые в последнее время стали часто применяться на вновь вводимых линиях.

Рассмотрим в качестве примера объектов условные подстанцию А и подстанцию Б, тогда сам процесс будет происходить следующим образом (рис. 2, а, б):

1. С подстанции А на подстанцию Б подается первичное напряжение и проверяется чередование фаз на вторичных цепях напряжения подстанции Б. В нашем примере чередование фаз на ПС Б оказалось обратным, но определить какие конкретно фазы перепутаны будет невозможно без наличия эталонного напряжения, с которым бы происходило сравнение.
2. После этого на полукомплект ДЗЛ подстанции А подается трехфазный симметричный ток от проверочного устройства с возможностью синхронизации с внешней сетью. Необходимость подачи именно тока обусловлена тем, что ДЗЛ не обмениваются между собой векторами напряжения. Для удобства мы подавали вектора тока синфазно с цепями напряжения. При этом синхронизация данного устройства должна быть выполнена со вторичными цепями напряжения, которые мы приняли за эталонные, на рис. 2 мы видим, что синхронизация производилась с фазами А-В ПС А.
3. Для полукомплекта ДЗЛ подстанции Б данный ток является током приема вектора которого он будет выстраивать относительно «своего» напряжения и таким образом, если будет существовать фазный сдвиг между напряжением подстанции А и напряжением подстанции Б, то мы увидим это по смещению векторов тока приема. При данном опыте на векторной диаграмме полукомплекта ДЗЛ ПС Б мы видим, что сдвиг по фазе у тока приема фазы В и напряжения фазы В - отсутствует, что говорит о том, что фаза В не спутана. А токи

приема фаз A и C сместились относительно одноименных векторов напряжения, что говорит о том, что именно фазы A и C перепутаны местами. На **рис. 2, б** приведены реальные числовые значения, которые мы получали при воссоздании данного опыта.

Используя данный метод, возможно определение спутанной фазировки даже тогда, когда поменяны местами все три фазы и простая проверка чередования фаз

покажет правильный результат, а реально обнаружить несоответствие, если отсутствует эталонное напряжение, получится только при проверке под нагрузкой.

Также это применимо в случаях, если необходимо включить в параллель два объекта, питаемых от разных энергосистем (**рис. 3**) по временным либо вновь созданным схемам, когда существует вероятность фазного сдвига между напряжениями на этих объектах.

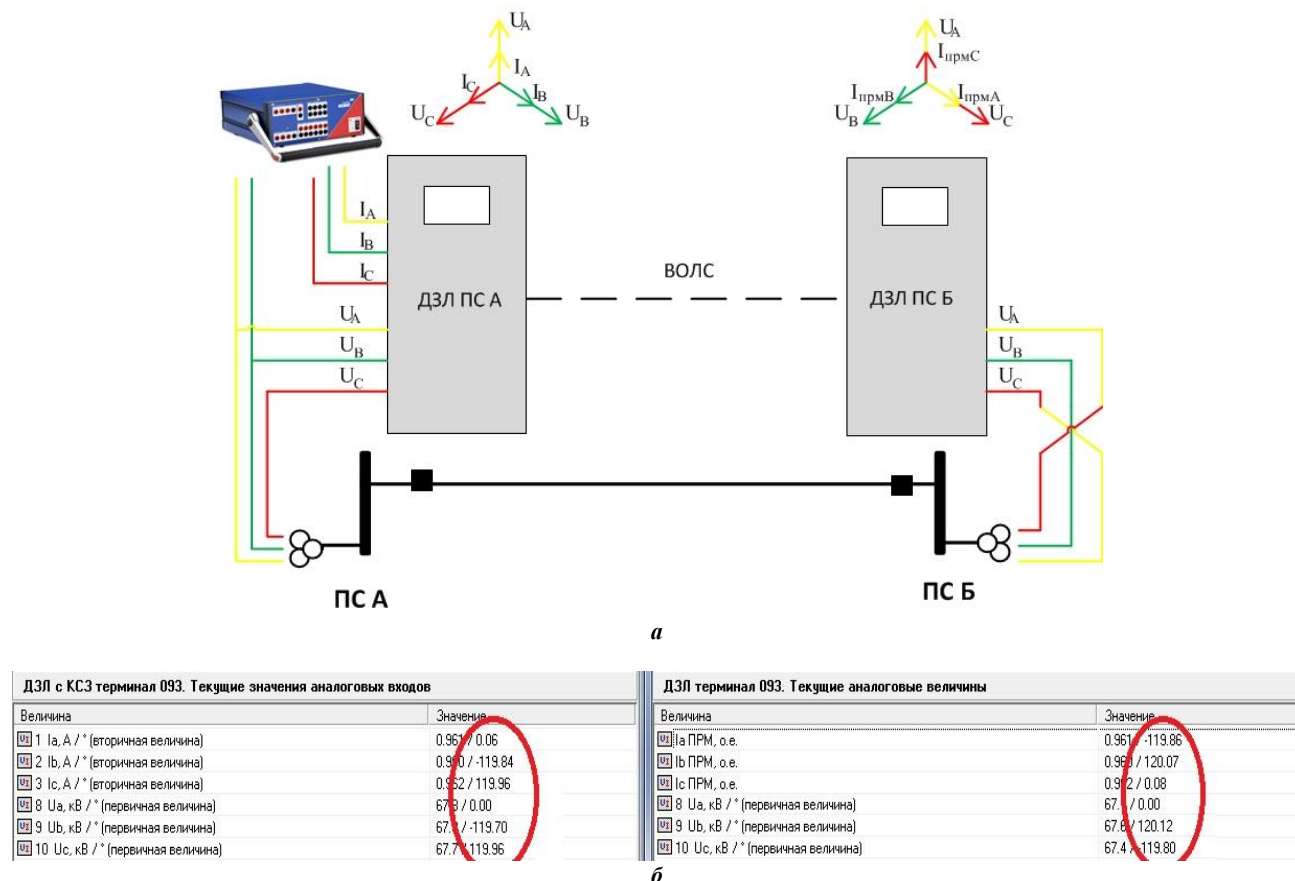


Рис. 2. Поясняющая схема фазировки с использованием ДЗЛ (а) и результаты реального опыта (б)

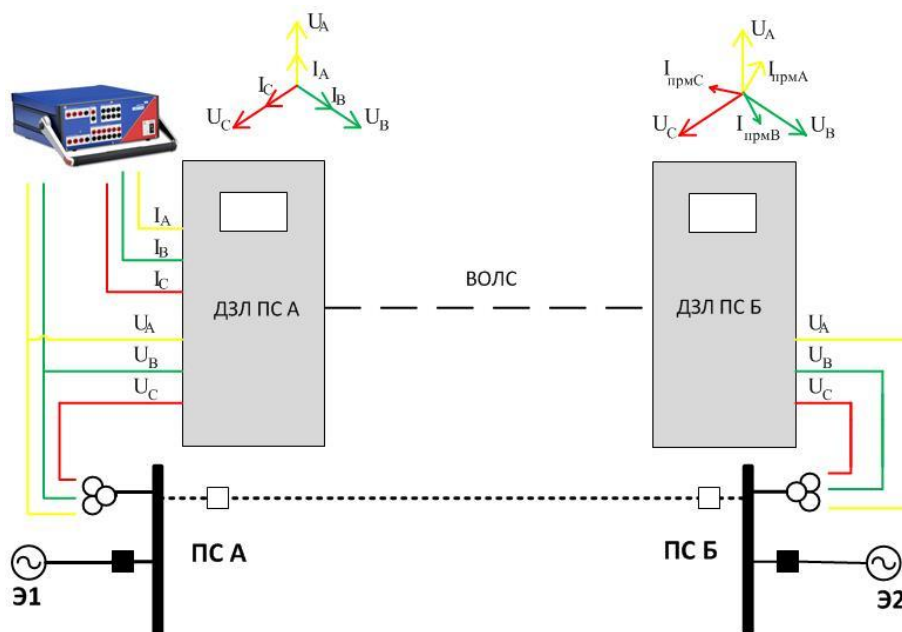


Рис. 3. Определение фазного сдвига между энергообъектами, питаемыми от разных энергосистем

Данный метод был успешно опробован и дал положительные результаты при включении ВЛ 220 кВ Щёлоков – ТАНЕКО, когда соединялись ПС 500 кВ Щёлоков и КРУЭ 220 кВ ОАО «ТАНЕКО», питаемые от разных энергосистем. И предварительный замер через ДЗЛ показал фазный сдвиг два градуса, что в дальнейшем подтвердилось традиционной подачей напряжения на «пустые» шины и замером вольтамперфазометром.

Также при вводе реконструированной подстанции на заводе ОАО «Аммоний», где отсутствовало эталонное напряжение, была произведена проверка правильности фазировки при помощи ДЗЛ и получен положи-

тельный результат.

Нами также проводилось множество лабораторных исследований с использованием двух полуккомплектов ДЗЛ, на которых имитировались различные варианты возможных событий в цепях напряжения, и во всех случаях результат оказался положительный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – М.: Книга по Требованию, 2013. 624 с.
2. Руководство по эксплуатации шкафа ДЗЛ типа ШЭ2607 093.
3. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учеб. пособие. М.: Логос, 2006. 254 с.

INFORMATION IN ENGLISH

PHASING OF ENERGETICS OBJECTS BY THE DIFFERENTIAL PROTECTION OF THE LINES WITH DATA COMMUNICATIONS USING FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINKS

Usmanov R.R., Petrov D.S.

The aim of the research was to receive the method of remote phasing of energetic objects using the vector transfer in the form of a digital signal by a longitudinal differential lines protection, which are working using fiber-optic line communications. A necessity of a method development appeared due to a situations, when on a new energetics objects there was no voltage, which makes possible to do the comparison while phasing. The development method was successfully tested in a laboratory conditions and also in process of facility commissioning of switchgear on OJSC “TANECO” and load-center substation on OJSC “Ammonium”.

Keywords: phasing, differential protection of connection lines, electric substation, fiber-optic communication link, power line, synchronization.

REFERENCES

1. Chernobrovov N.V. *Relejnaya zashchita* [Relay protection]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2013, 624 p.
2. Operating manual of DZL-type locker SHE2607 093.
3. Lykin A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Logos, 2006, 254 p.

УДК 621.314.64

Белый А.В., Маклаков А.С., Радионов А.А.

НОВЫЙ МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УМНЫХ СЕТЕЙ

Главная цель статьи состоит в разработке нового способа управления активным выпрямителем напряжения (АВН) для компенсации реактивной мощности в питающей сети. Основное внимание в этом исследовании было уделено теоретическому анализу возможности управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть. На основании полученных результатов мы можем сделать вывод о том, что регулирование реактивной мощности с помощью АВН возможно при использовании новой системы автоматического регулирования (САР). Наиболее актуально использовать новую САР, когда рядом с точкой подключения к питающей сети параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой. Это позволит уменьшить величину потребляемой реактивной мощности с подстанции и улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения в целом для предприятия.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения; замкнутая система управления; корректировка коэффициента мощности; компенсация реактивной мощности; промышленная умная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

Последние законодательные акты Правительства РФ, регламентирующие коммерческие отношения предприятий с энергосистемой, показывают, что на потребителя электрической энергии возлагаются достаточно высокие требования и обязанности. В частности, введены нормативные значения коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi=0,4$ для внутризаводских сетей напряжением 6-20 кВ и $\text{tg}\varphi=0,35$ для напряжения 0,4 кВ. Кроме того, для стимулирования выполнения данных требований Федеральной службой по тарифам

РФ введена новая методика расчета повышающих или понижающих коэффициентов на потребляемую электроэнергию. Эта методика предоставляет потребителю возможность получить скидку на электроэнергию при поддержании требуемого коэффициента реактивной мощности. Участие потребителя в соглашениях с сетевой организацией регулируется Постановлением Правительства РФ. Следовательно, возможности компенсации реактивной мощности на предприятиях приобретают особую актуальность и значимость.

В настоящее время наиболее широкое распро-

странение получили статические компенсаторы реактивной мощности на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых устройств, которые в общих чертах представляют собой батарею конденсаторов, подключенную в точке избыточного потребления реактивной мощности [1]. Такая компенсация может применяться в различных узлах электрических цепей для различных классов напряжения [2]. Кроме того, массовое внедрение в производство получили активных выпрямители напряжения (АВН) для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока [3]. Такие выпрямители тоже имеют возможность участвовать в регулировании реактивной мощности в питающей сети [4]. Однако уровень теоретических и прикладных исследований мощных активных АВН при управлении режимами компенсации реактивной мощности не соответствует должному рассмотрению в отечественной и зарубежной литературе.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка и исследование нового энергосберегающего способа управления АВН для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока. Решения основных теоретических задач получены методами математического и имитационного моделирования в среде *Matlab* приложения *Simulink*. Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть.
2. Предложена и синтезирована система управления АВН в режимах регулирования реактивной мощности.
3. Представлено теоретическое рассмотрение интеграции реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока на базе АВН в интеллектуальную промышленную сеть.

СИСТЕМА АВН – ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ

АВН представляет собой управляемый источник напряжения со звеном постоянного тока (DC) [5-7]. В большинстве случаев для питания реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока с номинальной мощностью выше 1 МВт АВН выполняются по трехуровневой топологии с разделительными диодами [8, 9]. Для АВН применяют современные алгоритмы коммутации полупроводниковых ключей с удалением выделенных гармоник или с минимизацией суммарного показателя гармонического искажения (THD) [10-14]. На **рис. 1** представлена принципиальная схема АВН, однофазная схема замещения и векторная диаграмма.

Принцип действия АВН с удобно рассмотреть с помощью однофазной схемы замещения на **рис. 1, б**. В точке подключения к сети его можно представить в виде источника выходного напряжения E_{ABH} , подключенного через реактор с эквивалентным индуктивным сопротивлением X_L и эквивалентным активным сопротивлением R к питающей сети с напряжением E_c . Разность напряжений E_{ABH} и сети E_c приходится на X_L и R , падения напряжения на которых U_L и U_R , α – угол сдвига между E_{ABH} и E_c и φ – угол сдвига между током

I и E_c . Из векторной диаграммы (**рис. 1, б**) можно вывести уравнения для активной P_c , реактивной Q_c и полной мощности S_c относительно питающей сети [15]:

$$P_c = \frac{E_c E_{ABH} (R \cdot \cos(\alpha) + X_L \sin(\alpha)) - E_c^2 R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{E_c E_{ABH} (X_L \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)) - E_c^2 X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{E_c^2 (E_{ABH}^2 - 2 \cdot E_{ABH} E_c \cos(\alpha) + E_c^2)}{R^2 + X_L^2}}, \quad (3)$$

$$E_{ABH} = m \cdot U_{dc} \cdot K_{ШИМ}, \quad (4)$$

где K_{ABH} – коэффициент ШИМ, U_{dc} – напряжение DC, m – коэффициент модуляции.

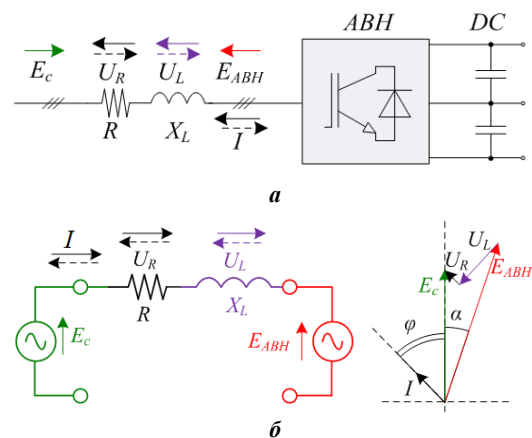


Рис. 1. Принципиальная схема АВН (а), однофазная схема замещения и векторная диаграмма (б) в точке подключения к сети

Используя уравнения (1)-(3) и (4) на **рис. 2** построены графики зависимостей активной $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$, реактивной $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ и полной $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ мощности для всех возможных углов α . Для построения графиков использовались следующие параметры в системе относительных единиц: угол α в диапазоне от -180° до $+180^\circ$; выходное напряжение E_{ABH} в диапазоне от 0 до 2 о.е.; напряжение сети $E_c = 1$ о.е.; $R = 0,003$ о.е.; $X_L = 0,5$ о.е. Значения были приняты с целью построения наглядных трехмерных поверхностей и определения максимумов и минимумов функций.

Анализ зависимостей на **рис. 2** показал, что положительные максимумы активной, реактивной и полной мощности достигаются при максимальном напряжении $E_{ABH} = 2$ о.е., но при различных углах α . Отрицательные максимумы полной (**рис. 2, в**) и реактивной (**рис. 2, б**) мощности совпадают при $E_{ABH} = 2$ о.е. и $\alpha = \pm 180^\circ$. Положительный максимум и минимум активной мощности достигается при $E_{ABH} = 2$ о.е. и $\alpha = \pm 90^\circ$ (**рис. 2, а**).

В серийно выпускаемых АВН диапазоны изменения угла α и выходного напряжения могут отличаться в зависимости от силовой схемы. В большинстве случаев у АВН при работе на двигатель переменного тока угол α находится в малых диапазонах $\pm 10^\circ$, а выходное напряжение в среднем может составлять от 70 до 130% действующего напряжения сети. Кроме того, величина

потребляемой или инвертируемой активной мощности из питающей сети определяется исключительно нагрузкой. Это может вносить существенные ограничения в условия работы АВН в режимах генерации реактивной мощности. На **рис. 3** показаны зависимости с учетом рассмотренных выше ограничений при тех же параметрах.

На **рис. 3**, в видно, что полная мощность S_c АВН имеет максимумы при углах $\pm\alpha_{max}$ при напряжениях E_{ABH} равное 0,7 и 1,3 о.е. Используя зависимости на **рис. 3** можно построить систему управления АВН таким образом, чтобы при определённых значениях α и напряжениях E_{ABH} обеспечивалось постоянство максимальной потребляемой полной мощности из питающей сети $S_c = f(E_{ABH}, \alpha) = S_{cmax}$ и поддерживалась требуемая активная мощность со стороны нагрузки. Для того чтобы АВН не вышел за пределы ограничения по максимальной мощности, необходимо обеспечить зависимое ограничение величины реактивной мощности Q_{clim} , используя следующее уравнение:

$$Q_{clim} = \sqrt{S_{cmax}^2 - P_c^2}. \quad (5)$$

НОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВН

За основу построения новой системы управления (СУ) АВН была принята классическая структура с прямой ориентацией по вектору питающего напряжения, которая подробно рассмотрена в трудах [16, 17]. При построении такой СУ приняты следующие допущения: идеальная синхронизация с питающей сетью; симметричная система питающих напряжений; баланс напряжений в звене постоянного тока (DC). В СУ используются пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы токов по осям dq , ПИ регулятор напряжения DC и регулятор реактивной мощности с зависимым ограничением [18]. На **рис. 4** показана функциональная схема СУ АВН.

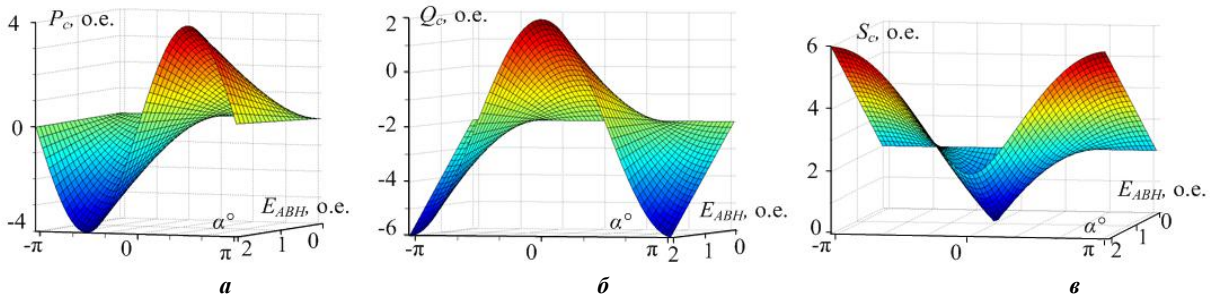


Рис. 2. Графики зависимостей $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (а), $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (б), $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (в)

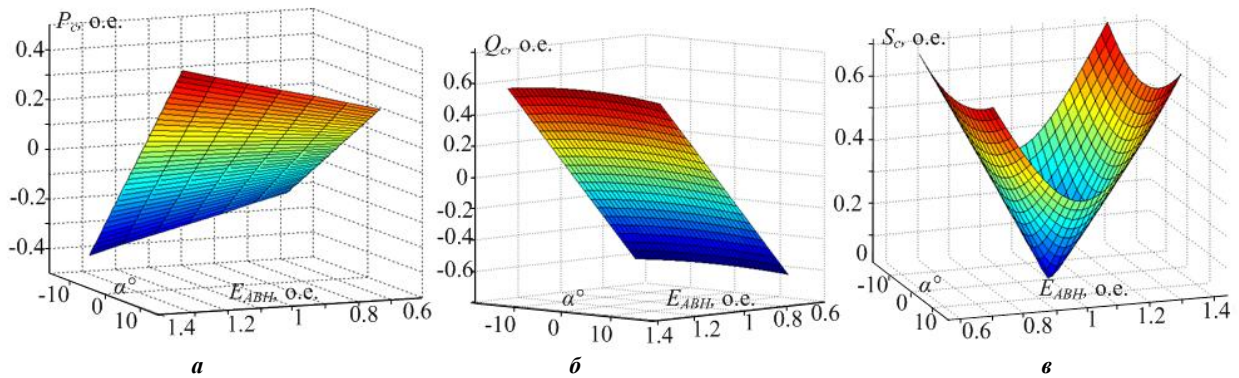


Рис. 3. Графики зависимостей $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (а), $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (б), $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ (в) с учетом ограничений

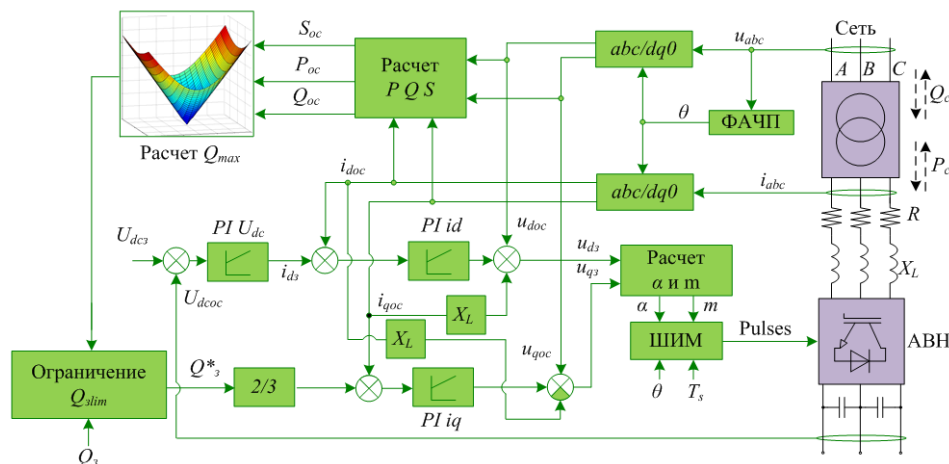


Рис. 4. Рис. 4. Функциональная схема новой СУ АВН

На рис. 4 приняты следующие обозначения: X_L , R – эквивалентное индуктивное и активное сопротивление в точке подключения АВН к сети переменного тока; T_S – период квантования ШИМ; m – коэффициент модуляции АВН; α – угол сдвига; u_{abc} – напряжения сети; i_{abc} – токи сети; θ – угол поворота вектора напряжений сети в системе dq ; i_{d3} и i_{d0c} – заданный и реальный ток по оси d ; i_{q3} и i_{q0c} – заданный и реальный ток по оси q ; $U_{dc\max}$ и U_{dc0c} – заданное и реальное напряжение DC ; P_{oc} , Q_{oc} и S_{oc} – измеренная активная, реактивная и полная мощность; Q_{lim} – рассчитанное ограничение по реактивной мощности; Q_3 – заданная реактивная мощность; Q^*_3 – заданная реактивная мощность с учетом ограничения; ФАЧП – устройство фазовой автоподстройки частоты.

СИСТЕМА АВН – ПРОМЫШЛЕННАЯ SMART GRID

Авторами предлагается использовать новую СУ АВН, когда рядом с точкой подключения к питающей сети параллельно работают потребители реактивной мощности. Перспективен такой способ управления совместно с технологией интеллектуальной промышленной сети (Industrial Smart Grid). Industrial Smart Grid может осуществлять на верхнем уровне управления мониторинг в реальном времени коэффициента мощности сети $\cos(\varphi)_c$ и формировать на локальном уровне управления АВН задание на генерацию или потребление реактивной мощности Q_3 . Это позволит корректировать коэффициент мощности в точке подключений к питающей сети и компенсировать избыточную реактивную мощность [19]. Когда на подстанции будет перекомпенсация или недокомпенсация реактивной мощности, то в зависимости от режима работы электропривода АВН сможет сгенерировать или потребить некоторую величину реактивной мощности, тем самым улучшив коэффициент мощности в требуемой точке сети. На рис. 5 показан в упрощенном виде принцип корректировки коэффициента мощности сети посредством энергосберегающей СУ АВН для интеллектуальной системы электроснабжения предприятия.

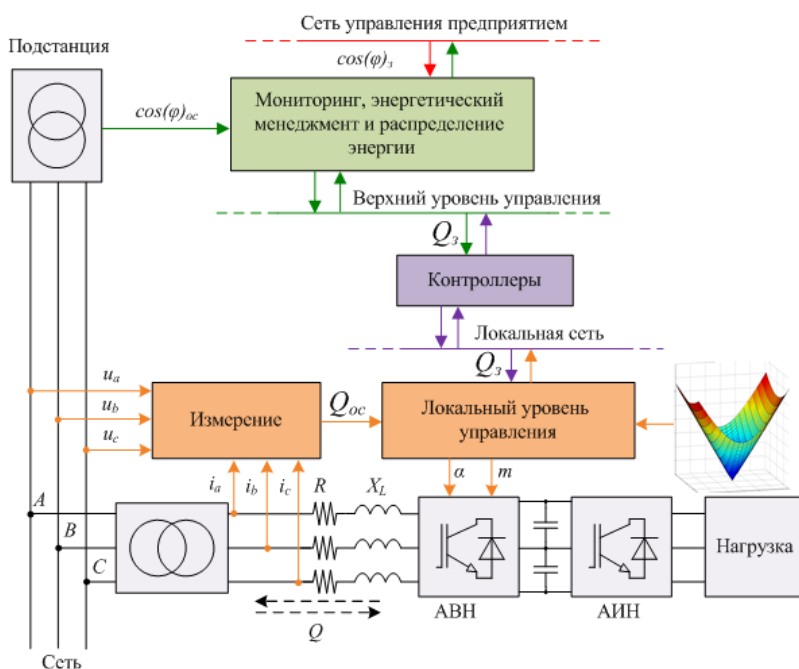


Рис. 5. Функциональная схема интеллектуальной промышленной сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследований был проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АВН – питающая сеть и построены зависимости потоков мощности в этой системе. На базе этих зависимостей разработана новая СУ АВН. Определено, что с помощью новой СУ АВН при питании реверсивных автоматизированных электроприводов переменного тока можно компенсировать реактивную мощность и корректировать коэффициент мощности питающей сети. Это позволит снизить расход электроэнергии, стабилизировать напряжение и повысить пропускную способность сети. Величину потребляемой или генерируемой реактивной мощности необходимо рассчитывать в соответствии с нагрузочной диаграммой электропривода. Наиболее актуально использовать данный метод управления, когда рядом с точкой подключения электропривода к питающей сети параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой, т.е. потребители реактивной мощности. Особенно перспективно такой способ управления использовать совместно с технологией промышленной Industrial Smart Grid.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКО-Ма // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. № 1. С. 38-46.
2. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. Pontt, and S. Kouro Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.
3. J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
4. Маклаков А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 1. С. 43-50.
5. Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. UK: John Wiley & Sons, Ltd., p. 398. 2011.
6. Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2. №1. С. 30-37.
7. A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi. A neutralpoint clamped PWM inverter. IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 1A-17, no. 5, pp. 518–523, Sept. 1981.
8. L.G. Franquelo, J. Napoles, R. Portillo, J.I. Leon, and M. Aguirre. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three level PWM converters. IEEE Trans. Ind. Electron., vol.54, no.6, pp. 3022–3029, Dec. 2007.
9. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48-52.
10. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на

питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. №1. С. 80-83.

11. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №4. С. 7-13.

12. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №1. С. 3-7.

13. Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 40-47.

14. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным

инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №1. С. 23-30.

15. Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Jose I. Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo and Maria A.M. Prats. The age of multilevel converters arrives. IEEE industrial electronics magazine. pp. 28–39. June 2008.

16. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие. / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.А. Мурзинов. Магнитогорск. 2012. 235 с.

17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 654 с.

18. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1. №2. С. 3-9.

19. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3– С. 16-25.

INFORMATION IN ENGLISH

NEW REACTIVE POWER COMPENSATION METHOD BY ACTIVE RECTIFIERS FOR INDUSTRIAL SMART GRID

Belyj A.V., Maklakov A.S., Radionov A.A.

The aim of this paper is to develop a new way to control active power rectifier (APR) for Reactive Power Compensation (RPC) in a power network. The emphasis of this research was on the theoretical analysis of controllability of the active, reactive and full power in the APR system - power network. On the basis of received results, we can make a conclusion about reactive power regulation with help of APR: it is possible with the use of a new automated control system (ACS). The most important thing is to use this new ACS, when the installations with a non-linear load work in parallel near with the consumption point of current. It allows to decrease the value of input reactive power from the electrical substation and to improve the technical-and-economic indexes of the electrical power supply system in whole for a factory.

Keywords: active power rectifier; feedback-control system; power factor correction; reactive power compensation; industrial smart grid.

REFERENCES

1. Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' silovoy skhemy moshchnogo STATKOMa* [Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2015. vol. 2, no. 1, pp. 18-46.

2. J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. Pontt, and S. Kouro. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.

3. J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.

4. Maklakov A.S., *Analiz raboty aktivnogo vypryamitelya napryazheniya v rezhimakh kompensatsii reaktivnoy moshchnosti* [Analysis of active power rectifier work in modes of reactive power compensation]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 1, pp. 43-50.

5. Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. UK:

John Wiley & Sons, Ltd., p. 398. 2011.

6. Maklakov A.S., Radionov A.A., *Issledovanie vektornoj SHIM s razlichnymi tablicami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovnevnogo preobrazovatelya* [Research of vector PWM with different selection tables of three level converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30-37.

7. A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi. A neutralpoint clamped PWM inverter. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 1A-17, no. 5, pp. 518–523, Sept. 1981.

8. L.G. Franquelo, J. Napoles, R. Portillo, J.I. Leon, and M. Aguirre. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three level PWM converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.54, no.6, pp. 3022–3029, Dec. 2007.

9. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov* [Evaluation of PWM-methods of active rectifiers voltage of rolling mills]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no.2., pp. 48-52.

10. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin R.R., Krubtsov D.S. *Issledovaniye vozdeystviya aktivnykh vypryamiteley bolshoy moshchnosti na pitayushchuyu set* [Investigation of the influence high power active rectifiers to the power network]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. 2013, no. 1, pp. 80-83.

11. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Metody shirotno-impul'snoy modulyatsii moshchnykh aktivnykh vypryamiteley pri nesimmetrii napryazheniya* [Methods PWM of large power active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, vol. 2, no. 4, pp. 7-13.

12. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnnykh elektroprivodov prokatnykh stanov* [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian

Internet Journal of Electrical Engineering]. 2014, Vol.1, no. 1, pp. 3-7.

13. Maklakov A.S., Radionov A.A., Vliyanie na set' tryohfaznogo mostovogo dvuhurovnevnogo aktivnogo vypryamitelya napryazheniya pri razlichnyh vidah SHIM [Influence of AFE rectifier with different types of PWM on supply power]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 2, pp. 40-47.

14. Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Belyi A.V. *Energosberegayushchij elektroprivod na baze dvuhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya* [Energy-saving electric drive on the basis of back to back converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2014, no. 1, pp. 23-30.

15. Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodríguez, Jose I. Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo and Maria A.M. Prats. The age of multilevel converters arrives. *IEEE industrial electronics magazine*, pp. 28-39. June 2008.

16. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh*

kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy: ucheb. posobiye [Simulation of electrical systems of metallurgical enterprises]. Magnitogorsk, 2012, 235 p.

17. Shreyner R.T. *Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives based on semiconductor frequency converters], Yekaterinburg: UrO RAN, 2010, 654 p.

18. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. *Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamitelya v nesimmetrichnyh rezhimakh raboty* [Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. Vol. 1, no. 2, pp. 3-9, 2014.

19. Maklakov A.S., *Imitacionnoye modelirovaniye glavnogo elektroprivoda prokatnoj kleti tololistovogo stana 5000* [Simulation of the main electric drive of the 5000 plate mill rolling stand]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2014, no.3, pp. 16-25.

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 681.518.5

Панов А.Н., Чистяков Д.В., Коробейников С.М., Гузей К.Е.

ПРИМЕНЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ГЛАВНОГО РЕДУКТОРА ПРИВОДА БЕСКОНУСНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Работу доменных печей в современных условиях невозможно представить без систем мониторинга состояния загрузочных устройств. Специалистами ЗАО «КонсОМ СКС» была внедрена стационарная система вибродиагностики главного редуктора бесконусного загрузочного устройства доменной печи №6 ОАО «ММК». Система отслеживает уровень среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости согласно ГОСТ 10816, а также СКЗ виброскорости на частотах, характерных для дефектов подшипников качения, используемых в редукторе.

Ключевые слова: стационарная система вибродиагностики, датчик вибрации, вибродиагностика, доменная печь, дефект, редуктор, среднеквадратическое значение.

Повышение качеств выплавляемого чугуна, вызванное экономическими и экологическими условиями, требует оптимизации работы доменных печей. Одной из главных задач совершенствования процессов доменной плавки является уменьшение расхода кокса. Эксплуатация доменных печей показала, что от распределения материалов в основном зависит вся газодинамика процесса и в конечном итоге технико-экономические показатели (ТЭП) печей. Важную роль в улучшении ТЭП печей играет рациональное распределение шихтовых материалов и газов по окружности и радиусу печи, а также герметизация ее рабочего объема в процессе загрузки и работы. Обе эти функции выполняют загрузочные устройства. Таким образом, техническое состояние загрузочного устройства является важнейшим фактором, влияющим на функционирование печи [2].

В рамках капитального ремонта доменной печи №6 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» была проведена установка бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) производства компании «Paul Wurth S.A.» (Люксембург). «Узким местом» данного БЗУ, по мнению специалистов службы главного механика, является главный редуктор, представленный на рис. 1.

Одним из методов оперативного определения технического состояния редукторов является вибродиагностический метод. В рамках капитального ремонта силами ЗАО «КонсОМ СКС» была спроектирована и реализована стационарная система вибродиагностики главного редуктора. На его корпус с помощью приварных бобышек были установлены два датчика вибрации (см. рис. 1). Система состоит из датчиков вибрации, каналов связи, контроллера, сервера опроса.

Учитывая постоянную скорость редуктора, был произведен математический расчет характерных частот дефектов подшипников качения.

Основная экранная форма, представленная на рис. 2, на которой изображена кинематическая схема редуктора, в режиме реального времени отображает показания среднеквадратичного значения (СКЗ) виброскорости согласно ГОСТ 10816 [1, 3].

Информация об уровне СКЗ согласно расчетным данным частот дефектов подшипников качения, установленным в редукторе, отображается на мнемосхеме

«БЗУ.Вибродиагностика.Редуктор». Вид данной мнемосхемы представлен на рис. 3.

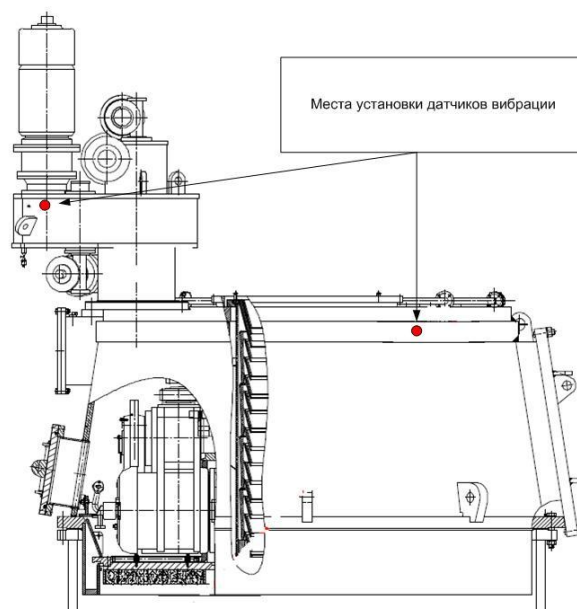


Рис. 1. Главный редуктор БЗУ с указанием мест установки датчиков вибрации

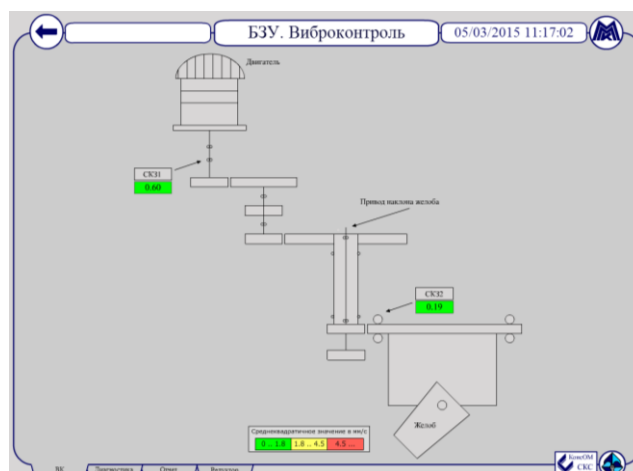


Рис. 2. Мнемосхема кинематической схемы редуктора

На рис. 4 представлен вид спектра вибросигнала. На нем выделяется уровень сигнала на частотах, характерных для каждого из подшипников качения.

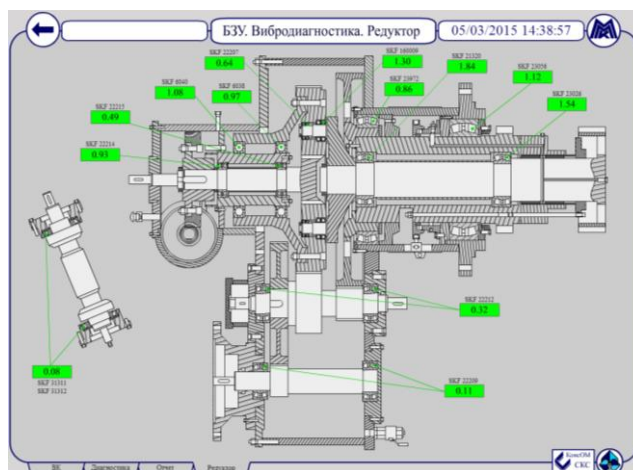


Рис. 3. Мнемосхема диагностики подшипников

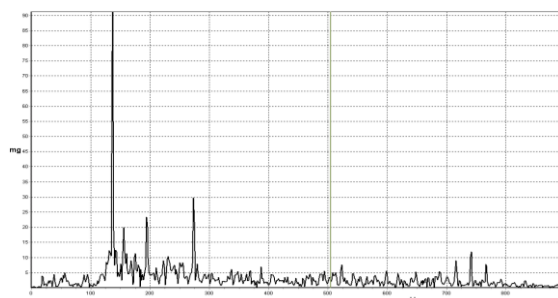


Рис. 4. Спектр вибросигнала основного подшипника вращения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные функции внедренной системы:

- 1) измерение, контроль и оценка технического состояния главного редуктора привода БЗУ;
- 2) обнаружение отклонений от нормальной работы главного редуктора и предотвращение аварийной остановки доменной печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загрузочные устройства шахтных печей / В.П. Тарасов - М.: Metallurgiya, 1974. - 312 с.
2. ГОСТ Р ИСО 10816-1-97. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Введ. 1999-07-01. М.: Издательство стандартов, 1998. 13 с.
3. Опыт применения автоматизированных стационарных систем виброконтроля и вибродиагностики / Ишметьев Е.Н., Панов А.Н., Романенко А.В., Васильев Е.Ю., Коробейников С.М.// Электротехнические системы и комплексы. 2014. №1(22). С. 56-59.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLYING THE STATIONARY SYSTEM OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF MAIN GEAR BOX OF BLAST FURNACE BELL-LESS TOP DRIVE

Panov A.N., Chistjakov D.V., Korobejnikov S.M., Guzej K.E.

It is impossible to imagine blast furnaces work without statuses monitoring systems of feeding equipment in modern conditions. Stationary system of vibration diagnostics of a main gearbox of blast furnace number six bell-less top at OJSC "Magnitogorsky iron & steel works Russia" was implemented by specialists of CJSC «KonsOM SKS». The system monitors the level of vibration diagnostics mean square value (RMS) according to all-Union State Standard 10816, and also the vibration speed RMS on the frequencies, which characterize the defects of gear antifriction bearings.

Keywords: stationary system of vibration diagnostics, vibration sensor, vibration diagnostics, blast furnace, defect, gear, mean square value.

REFERENCES

1. Tarasov V.P. *Zagruzochnye ustrojstva shahtnyh pechej* [Feeder units of shaft furnaces]. Moscow: Metallurgija, 1974, 312 p.
2. GOST R ISO 10816-1-97. Machine state control basing on the vibration of non-rotating part measuring. Applied 1998-07-01. Moscow: Standarts publishing house, 1998. 13 p.
3. Opyt primeneniya avtomatizirovannyh stacionarnykh sistem vibrokontrolja i vibrodiagnostiki [Practical experience of automated stationary vibration control and vibration diagnostics system application]. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, vol. 22, pp. 56-59.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.365.5

Ячиков И.М., Ларина Т.П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕЛА ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Проведены экспериментальное и компьютерное исследования положения точек равновесия цилиндрического тела в цилиндрическом индукторе с противовитком. Показана адекватность созданной ранее математической модели и компьютерной программы для приближенных инженерных расчетов положения равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического тела, а также для определения критических значений тока и плотности материала тела.

Ключевые слова: левитационная плавка, высокочастотный индуктор, пояс Роговского, напряженность магнитного поля, взвешенное состояние металла, электромагнитная сила, положение равновесия.

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес к высокочастотному индукционному нагреву и левитационной плавке связан, прежде всего, с появлением простых, надежных и дешевых высокочастотных источников питания. Такие устройства не сложнее бытовых сварочных инверторов с питанием от 220 В. Высокочастотное электромагнитное поле с частотой до 200 кГц, создаваемое такими источниками, позволяет легко нагревать и плавить различные металлы. Кроме этого, специальная конструкция индуктора позволяет удерживать металл во взвешенном состоянии (левитационная плавка). Это дает возможность выплавлять особо чистые металлы и сплавы, так как отсутствует взаимодействие обрабатываемых материалов с футеровкой печи.

Однако в теории и практике использования левитационной плавки остается нерешенным ряд проблем. Так, отсутствуют простые методы расчета поведения металла в индукторе с обратным витком. Последние наиболее значимые научные работы в этой области относятся к 80 гг. прошлого века, например работы [1, 2]. Нет практических критериев и рекомендаций по вопросу: будет ли наблюдаться взвешенное состояние при данной конструкции индуктора, параметрах источника питания, размерах и свойствах тела? Нет инженерных методик, позволяющих прогнозировать положения тела и характер его движения во взвешенном состоянии. Практическое широкое применение высокочастотного индукционного нагрева и плавки металлов, удерживаемых электромагнитным полем, сталкивается с проблемой простых методов измерения параметров высокочастотного тока индуктора.

В работах [4-6] предложена математическая модель для определения амплитуды напряженности магнитного поля и упрощенная одномерная математическая модель для нахождения положения металлического тела при его удержании во взвешенном состоянии в индукторе с обратным витком. Проведено компьютерное моделирование положения возможных точек равновесия цилиндрического и шарообразного тел в магнитном поле индуктора заданной конструкции [4, 5].

Целью работы является экспериментальное исследование положения тела во взвешенном состоянии в цилиндрическом индукторе с обратным витком и проверка на адекватность созданной ранее математической модели.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве базовой схемы инвертора использовалась конструкция, предложенная Кухтецким С.В. [3]. Блок-схема инвертора, эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева и подключение основных измерительных приборов показаны на **рис. 1**. Диапазон рабочих частот инвертора – от 30 до 200 кГц, питание осуществлялось от сети 220 В. Мощность инвертора изменялась в диапазоне от 0 до 2 кВт грубо с помощью ЛАТРа и плавно – регулятором мощности на симисторе.

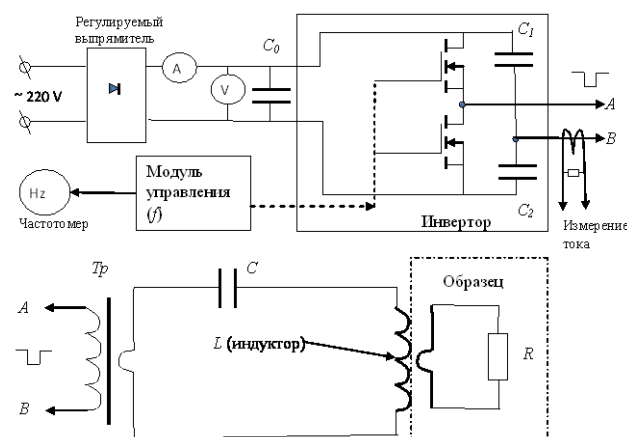


Рис. 1. Блок-схема полумостового инвертора и эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева

Трансформатор Tr изготовлен из двух ферритовых колец K45x28x12 марки M2000NM. Первичная обмотка, которая подсоединяется непосредственно к выходу инвертора, содержит 10-26 витков провода МГТФ диаметром 1 мм. Роль вторичной обмотки, состоящей из одного витка, выполняет одна из отводных трубок индуктора (медь, внешний диаметр 6 мм), проходящая через центр кольца трансформатора. Индуктор L вместе с конденсатором C образует последовательный колебательный контур, на резонансную частоту которого настраивается инвертор. Металлический образец, помещенный в индуктор, на эквивалентной схеме можно представить как активное сопротивление R , индуктивно связанное с индуктором L .

В качестве емкости C в контуре индуктора использовалось 144 полипропиленовых высоковольтных конденсатора СВВ81 общей емкостью $144 \times 0,033 \text{ мкФ} = 4,752 \text{ мкФ}$. Для измерения и контроля

частоты инвертора использовался электронно-счетный частотомер.

Индуктор представляет собой цилиндрическую катушку высотой $H=76$ мм, содержащую 9 основных витков и 1,5 противовитка (рис. 2). Катушка изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм; внешний, внутренний и средний диаметры катушки: 37,5, 29,3 и 32,4 мм соответственно. Среднее расстояние между витками $a=76/8 \approx 9,5$ мм. Расстояние от основной катушки до противовитка - $a_1 \approx 11$ мм.

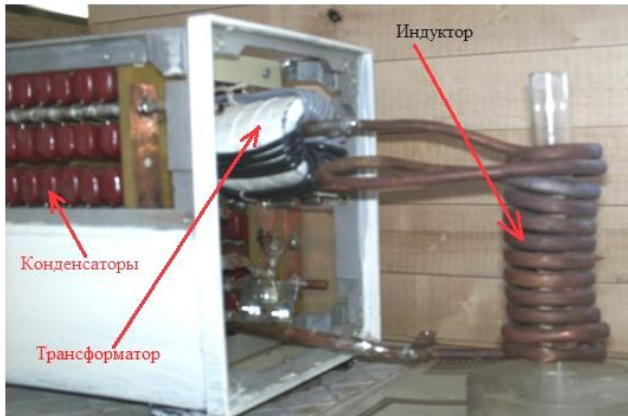


Рис. 2. Индуктор в виде цилиндрической катушки с противовитком

С помощью прибора HenryTest (www.henrytest.ru) было проведено измерение индуктивностей: катушки индуктора $L=1,27$ мкГ, основной катушки $L_1=1,12$ мкГ, а также противовитков $L_2=0,351$ мкГ.

Для измерения переменной составляющей тока в первичной обмотке трансформатора Tr использовался пояс Роговского, который принципиально является катушкой без сердечника, располагаемой вокруг проводника с током (рис. 3). Такая конструкция катушки обеспечивает высокую защиту от внешних электромагнитных помех и высокую линейность выходного напряжения по отношению к измеряемому току, точность и надежность. Если обмотка пояса Роговского замкнута на сопротивление R_n , то изменение тока в поясе $I(t)$ описывается уравнением

$$L \frac{dI}{dt} + (r + R_n)I = -L_{12} \frac{dI_0}{dt},$$

где L , r - индуктивность и сопротивление катушки соответственно, L_{12} - взаимная индуктивность между катушкой и проводником, которую можно найти исходя из магнитного потока через катушку, порождаемого током I_0 как $L_{12} = L/n$. Катушка работает в режиме трансформатора тока, поэтому выходное напряжение $U(t) = I(t)R_n$.

Индуктивность катушки, намотанной на тороид, можно определить как $L = -Sn^2\mu_0/l$, где S - площадь малого контура (одного витка вокруг центральной жилы катушки); l - длина пояса; n - количество витков, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ В·с/(А·м) - магнитная постоянная. Таким образом, напряжение на выходе катушки

$$U(t) = -\frac{Sn\mu_0}{l} \frac{dI_0}{dt}. \quad (1)$$

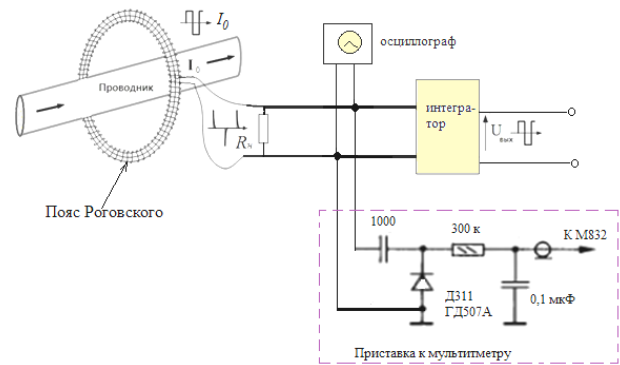


Рис. 3. Измерение переменного тока с помощью пояса Роговского

Для измеряемого тока, подчиняющегося гармоническому закону $I_0(t) = I_{m0} \sin(\omega t)$, имеем

$$U(t) = -I_{m0} \frac{Sn\mu_0}{l} \omega \cdot \cos(\omega t), \quad \text{где } \omega = 2\pi\nu, \quad \nu -$$

частота тока. Амплитуда выходного сигнала $U_m = I_{m0} Sn\mu_0 \omega / l$, действующее значение $U_d = Sn\mu_0 \omega \cdot I_{0d} / l$. Таким образом, значение тока в проводнике в зависимости от измеряемого напряжения и частоты тока

$$I_{0d} = U_d \frac{l}{Sn\mu_0 \omega} = U_d \frac{\zeta}{\omega}, \quad (2)$$

где $\zeta = \frac{l}{Sn\mu_0} = \frac{n}{L} = \frac{1}{L_{12}}$ - постоянная кольца Роговского (величина обратная взаимной индуктивности катушки и проводника).

С использованием пояса Роговского был изготовлен датчик высокочастотного переменного тока, имеющий следующие параметры: $n=28$, $R_n=10,3$ Ом, измеренная индуктивность $L_{12}=0,748$ мкГ, $\zeta = 3,74 \cdot 10^7$ А/(В·с). Амплитуда выходного сигнала U_m измерялась посредством осциллографа. Кроме того, для измерения высокочастотного напряжения было опробовано устройство с использованием обычного цифрового мультиметра (например М832) с верхним пределом измерения 200 мВ или 2 В, подключенный к ВЧ приставке, схема которой показана на рис. 3. Экспериментально установлено, что данная приставка позволяет довольно достоверно измерить ВЧ напряжение в диапазоне от 10 мВ до 2 В с точностью $\pm 2,5\%$. Зная коэффициент трансформации трансформатора Tr (см. рис. 1), можно определить действующее значение и амплитуду тока в индукторе. Для данной конструкции индуктора инвертор позволял выдавать максимальную амплитуду тока около 600 А.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Посредством математической модели, рассмотренной в работах [4-6], и с помощью созданной компьютерной программы [7] проведено моделирование поведения амплитуды напряженности магнитного поля в индукторе. На рис. 4 приведены результаты расчета вертикальной составляющей и модуля вектора напря-

женности магнитного поля в экспериментальном индукторе с обратным витком при значении тока $I=300$ А.

Компьютерная программа позволяет получать распределение напряженности магнитного поля по высоте индуктора в виде полинома заданной степени. Для нашего индуктора получено уравнение регрессии в виде полинома четвертой степени отношения амплитуды вертикальной проекции напряженности магнитного поля на оси индуктора ($r=0$) к амплитуде тока через индуктор по его высоте

$$\frac{H_0(z)}{I} = 6,951047680 \cdot 10^{-6} z^4 - 1,491105024 \cdot 10^{-3} z^3 + 0,071513088 z^2 + 0,037543671875 z + 66,546, \text{ мм}^{-1},$$

где z - расстояние от нижнего основания катушки, мм.

При этом средняя относительная ошибка аппроксимации составила около 5%. Это уравнение далее использовалось для расчета положения точек равновесия.

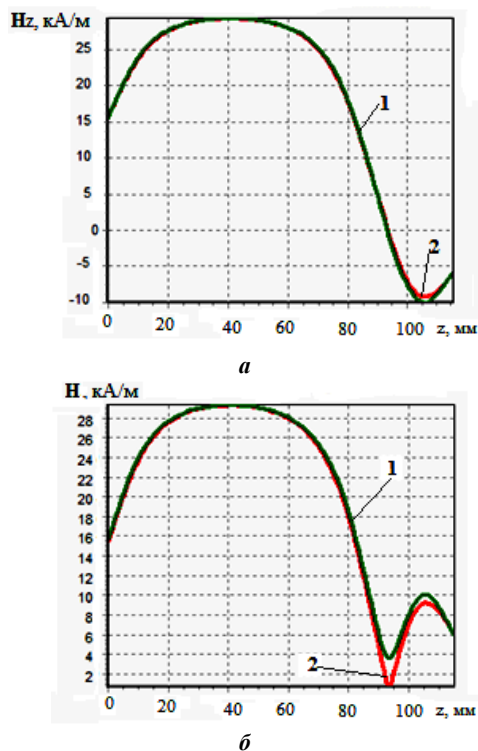


Рис. 4. Вертикальная составляющая (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) по высоте индуктора вблизи его оси ($I=300$ А): 1 - $r=0$ мм; 2 - $r=5$ мм

В экспериментах участвовали два алюминиевых цилиндрических тела (образца) диаметром $d=5$ мм: образец №1 - высотой $h_0=3,8$ мм, массой $m_0=0,20$ г; образец №2 - высотой $h_0=6,6$ мм, массой $m_0=0,43$ г. Масса образцов измерялась электронными весами МН-200. Резонансная частота индуктора при этих условиях составляла около 54 кГц.

Для уменьшения веса образца и гашения колебательного движения тела во взвешенном состоянии образец помещали в воду. Для этого в индуктор помещали пробирку с водой (см. рис. 2). После включения инвер-

тора для гарантированного удержания тела во взвешенном состоянии через индуктор подавали заведомо большой ток. Далее осторожно помещали образец в воду с помощью пластмассового пинцета в предполагаемое место равновесия. Визуально тело довольно быстро приходило к положению равновесия, при котором колебания тела были практически незаметны, при этом довольно часто наблюдалось вращение цилиндра вокруг своей оси, а при некоторых режимах замечалось несхождение оси цилиндра с осью индуктора. Положение равновесия тела измерялось посредством вертикальной линейки с точностью 1 мм. Далее ток плавно снижался, при этом фиксировалось положение тела до момента его падения.

На рис. 5 показаны результаты компьютерного моделирования (непрерывные линии) и экспериментальные значения положения точек равновесия тела от амплитуды тока в индукторе. Расстояние z_0 определялось от нижнего основания катушки до нижнего торца цилиндрического образца.

Видно, что с уменьшением тока тело опускается, причем чем меньше высота цилиндра, тем тело находится выше и, начиная с некоторого значения тока $I_{\max}$, при его увеличении положение тела меняется незначительно. Эксперимент показал, что действительно существует некое значение тока $I_{\min}$, ниже которого поле не удерживает цилиндрическое тело.

Экспериментальные данные с точностью до ошибок измерения близки к расчетным. Это позволяет говорить, что в исследуемом диапазоне токов индуктора математическая модель и компьютерная программа адекватно для приближенных инженерных расчетов описывают положение равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического тела.

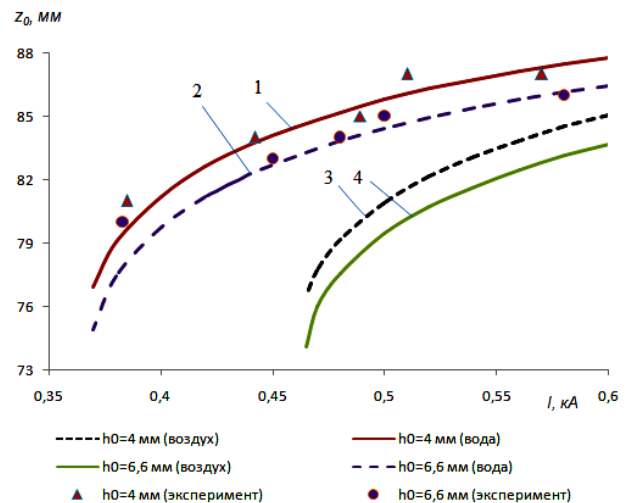


Рис. 5. Расчетное и экспериментальное положение точек равновесия тел от амплитуды тока индуктора для двух алюминиевых цилиндрических образцов разной высоты

На рис. 6 показаны расчетные зависимости производной силы от амплитуды тока индуктора в точке равновесия для двух алюминиевых цилиндрических тел, имеющих разную высоту h_0 , находящихся в воздухе и воде. Там же приведено экспериментальное значение тока (показаны минимальное и максимальное значения), при котором происходит потеря равновесия разных тел. При равновесии тела производная равно-

действующей силы $dF(z)/dz$ должна быть отрицательной, причем чем она выше по модулю, тем равновесие будет более устойчивым. Видно, что производная равнодействующей силы в точке равновесия при уменьшении тока падает практически линейно и при минимальном токе $dF(z_1)/dz=0$. Из рисунка видно также, что значение минимального тока $I_{\min}$ снижается с увеличением плотности окружающей тело среды и практически не зависит от массы тела и его размеров. Расчетное значение $I_{\min}$ оказалось ниже экспериментального примерно на 5%. Проведенное экспериментальное исследование для двух алюминиевых шарообразных тел диаметром 3,3 и 5,1 мм показало, что минимальный ток, при котором еще наблюдается равновесие, также не зависит от размера тел.

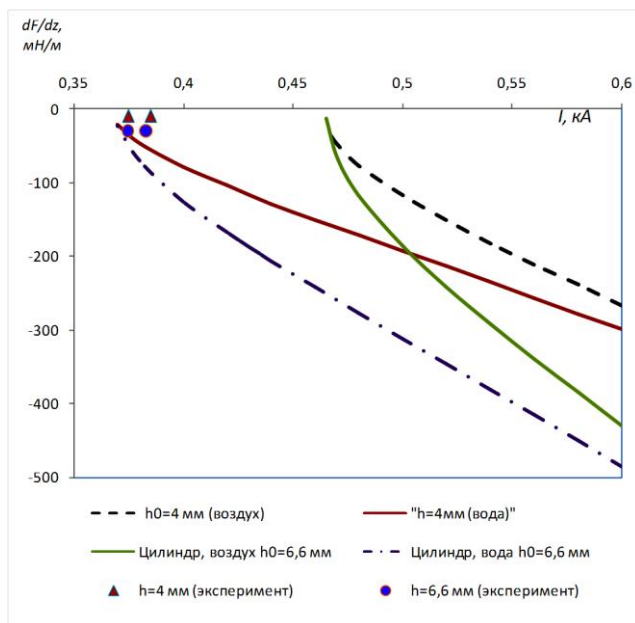


Рис. 6. Производная силы в точке равновесия от амплитуды тока индуктора для цилиндрических тел разной высоты. Точками показаны экспериментальные значения тока, при котором происходит потеря равновесия разных тел

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Создана экспериментальная установка по изучению положения тела во взвешенном состоянии в индукторе. Опробована методика измерения амплитуды силы тока от 30 до 200 кГц в индукторе с помощью катушки Роговского и высокочастотного милливольтметра с использованием высокочастотной приставки к цифровому мультиметру.

2. Проведены эксперименты по изучению положения тела во взвешенном состоянии. Показана адекватность созданной ранее математической модели и компьютерной программы для приближенных инженерных расчетов положения равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического тела, а также для определения критических значений тока и плотности материала тела.

3. Экспериментально и посредством компьютерного моделирования установлено, что положение равновесия металлического тела во взвешенном состоянии в индукторе зависит от протекающего через индуктор тока, плотности среды, где находится тело, а также от его формы и размеров.

4. Компьютерное моделирование и эксперимент показали, что существует минимальное значение тока, ниже которого магнитное поле не удерживает металлическое тело данных размеров. Этот ток не зависит от формы тела, в частности, от высоты и диаметра цилиндрического тела и от диаметра шарообразного тела (при размерах тела существенно меньше радиуса индуктора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979. 104 с.
2. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М.: Металлургия, 1974. 176 с.
3. Кухтецкий С.В. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева. URL: <http://www.icct.ru/Practicality/Papers/30-03-2010/Invertor-01.php> или <http://ku.nextmail.ru/pdf/Invertor-01.pdf>.
4. Ячиков И.М. Положение равновесия тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №3(24). С. 66-72.
5. Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Шмелев М.О. Моделирование поведения магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1. С. 47-53.
6. Ячиков И.М., Залютдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014, № 3. С. 58-63.
7. Ячиков И.М., Шмелев М.О. Моделирование напряженности магнитного поля в индукторе с противовитком: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2014614306. 2014.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BODY POSITION IN SUSPENSION STATE IN A CYLINDRICAL HIGH-FREQUENCY INDUCTOR WITH A REVERSE COIL

Yachikov I.M., Larina T.P.

Experimental and computer-aided researches of position the cylindrical solid balance points in the cylindrical inductor with reverse coil were reviewed. The adequacy of mathematical model of computer program, which were previously created, for approximate engineering calculations of a balance position in suspension state of a cylindrical body, and also for calculating the

critical current values and the body material density, was indicated.

Keywords: levitation melting, high-frequency inductor, Rogowski coil, magnetic field intensity, metal suspension state, electromagnetic force, balance position.

REFERENCES

1. Fogel A.A. *Induktsionnyy metod uderzhaniya zhidkikh metallov vo vzveshennom sostoyanii* [Induction method of retention of liquid metals in the suspended state]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1974. 104 p.
2. Glebovsky V.G., Bourtsev V.T. *Plavka metallov i splavov vo vzveshennom sostoyanii* [Melting of metals and alloys in a suspended state]. Moscow, 1974. 176 p.
3. Kukhtetskiy S.V. *Prostoy laboratornyy invertor dlya induktsionnogo nagreva* [Simple laboratory inverter for induction heating]. URL: <http://www.icct.ru/Practicality/Papers/30-03-2010/Invertor-01.php> or <http://ku.nextmail.ru/pdf/Invertor-01.pdf>.
4. Yachikov I.M. *Polozhenie ravnovesiya tela vo vzveshennom sostoyanii v vysokochastotnom induktore s obratnym vitkom* [Position balans of body suspended in high-frequency inductor with reverse coil]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. 2014, no.3(24), pp. 66-72.
5. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Shmelev M.O. *Modelirovaniye povedeniya magnitnogo polya i polozheniya tela vo vzveshennom sostoyanii v vysokochastotnom induktore s obratnym vitkom* [Modeling of the behavior of q magnetic field and the position of the body in a suspension in the high-frequency inductor with return round]. *Matematicheskoe i programnoye obespechenie sistem v promyshlennoj i social'noj sferah* [Mathematical and software systems in the industrial and social spheres]. 2013, no. 1, pp. 47-53.
6. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. *Issledovaniye magnitnogo polya v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka pri raznoy forme tokopodvodyashchey shiny k podovomu elektrodu* [Investigation of the magnetic field in the bath a DC arc furnace at different busbars to form the bottom electrode]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of the universities. Iron and steel]. 2014, no. 3, pp. 58- 63.
7. Yachikov I.M., Shmeliov M.O. *Modelirovaniye napryazhennosti magnitnogo polya v induktore s protivovitkom* [Modeling of the magnetic field in the inductor with reverse coil]. Certificate of state registration of the computer program. no. 2014614306, 2014.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.785:311.017

Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И.

СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ АДАПТИВНОГО КОМПЛЕКСА ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ В АСУ ТП ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Представлены результаты разработки системы визуализации параметров процесса программной адаптации управляющей автоматизированной системы локального уровня к информационной структуре управляемого производственного процесса.

Разработана структура информационной системы, обеспечивающей программную адаптацию контуров локального управления к реальному процессу управления нагревом непрерывнолитых заготовок в методических печах.

Ключевые слова: программная реализация, адаптивная система управления, визуализация процесса, диалоговый режим, контур управления, локальный уровень.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным и экономически целесообразным направлением совершенствования АСУ ТП является использование программируемых технических средств для синтеза самоприспосабливающихся (адаптивных) систем полевого (локального) уровня управления в иерархических АСУ ТП промышленного производства.

Такие системы, реализованные на базе комбинации УВМ и микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК), являясь основой всей структуры управления, способны автоматически реально обеспечить адаптацию и самонастройку стабилизирующих контуров управления технологическими параметрами производственного процесса практически без участия человека в диалоговом режиме с ним.

Реализация апробированной адаптивной системы полевого уровня управления рассмотрена на конкретном примере разработки системы автоматического управления тепловым режимом многозонной методической печи, предназначенной для нагрева массивных непрерывнолитых слябовых заготовок перед прокаткой на широкополосном стане горячей прокатки (ШСГП).

Обеспечение автоматизированного высокопроизводительного энергосберегающего производства горячекатаного широкополосного листового проката для выполнения намеченных программ в оборонной, судостроительной и трубной отраслях промышленного производства является важной и актуальной проблемой.

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Основными элементами программного обеспечения адаптивной объектно-ориентированной автоматизированной системы являются неизменяемая управляющая программа «координатор», функционирующая в режиме разделения времени и формируемый в диалоговом режиме с оператором-наладчиком блок исходных данных, варьируемый в зависимости от конкретного объекта управления (технологического процесса).

Управляющая программа, в зависимости от выбранного режима, управляет работой отдельных подпрограмм, осуществляющих реализацию следующих функций по адаптации системы.

Подпрограмма «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ»

осуществляет формирование отдельных локальных контуров управления технологическими параметрами путем назначения цифровых идентифицирующих кодов входных (управляющих) и выходных (управляемых) информационных и управляющих каналов в соответствии с принятыми технологическими наименованиями параметров. Одновременно осуществляется назначение кодов команд управления соответственно выбранного исполнительного механизма (ИМ).

Подпрограмма «ГРАДУИРОВКА» осуществляет адаптацию управляющей системы к информационной структуре, используемой на данном конкретном автоматизируемом технологическом агрегате. Целью является получение достоверной оперативной информации о текущем состоянии параметров управляемого процесса. Это достигается за счет формирования по каждому информационному каналу реальных градуировочных характеристик путем приведения в соответствие текущих величин «физическая величина параметра – код АЦП». Процедура осуществляется при установке соответствия реперных величин контролируемого параметра технологического процесса и соответствующих цифровых кодов аналогового цифрового преобразователя (АЦП) на всем диапазоне изменения выбранного параметра. Нелинейность градуировочных характеристик учитывается количеством реперных точек. Промежуточные значения вычисляются в соответствии с правилом линейной аппроксимации.

Подпрограмма «НАСТРОЙКА» обеспечивает адаптацию управляющего комплекса к технологическому объекту управления по каждому используемому локальному стабилизирующему цифровому контуру осуществлением реализации следующих последовательно выполняемых процедур:

1. Формирование и реализация плана тестирующих возмущающих воздействий с целью обеспечения определения достоверной результирующей динамической характеристики объекта управления по каждому контуру управления. План тестирующих воздействий определяется в соответствии с ортогональной функцией Уолша, обладающей уникальными свойствами по компенсации негативного влияния случайных технологических возмущений [1,2].
2. Определение динамических параметров управляемого технологического параметра по результирующей динамической характеристике (кривой разгона) по каждому регулируемому параметру [3].

3. Формирование цифровых аналогов ПИ или ПИД законов управления и определение рациональных значений динамической настройки для каждого контура с целью получения гарантированного устойчивого процесса управления [4, 5].

4. Расчет сигналов рассогласования и реализация управляющих воздействий с учетом выбранного закона управления и выбранной скорости перемещения исполнительного механизма по каждому контуру управления [6]. Это самая трудоемкая и важная процедура адаптации.

5. Подпрограмма «ИНДИКАЦИЯ» реализует процедуру визуализации на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) технолога-оператора всех текущих значений основных технологических параметров автоматизируемого процесса и результатов самодиагностики путем проверки достоверности получаемой с технологического объекта текущей информации.

Вызов подпрограмм осуществляется по сигналу прерываний от таймера с АРМа. Предусмотрена возможность, при формировании управляющего воздействия в каждом контуре, обеспечения пропорциональной скорости исполнительного механизма в зависимости от величины рассогласования. Минимальная продолжительность управляющего импульса не должна быть меньше 0,2 с вследствие наличия инерционности исполнительного механизма (ИМ), имеющего асинхронный двигатель с массивным ротором. Поэтому расчет хода ИМ осуществляется для повышения быстродействия выполнения данной операции при шестнадцатеричной форме представления чисел по всем каналам.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Процесс адаптации последовательно регламентирован.

Первоначально выбирается режим «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ», в котором последовательно выбирается из представляемого меню следующие позиции и коды составляющих элементов контура управления в диалоговом режиме:

- зона регулирования – «топильная зона»;
- контур регулирования – «регулирование температуры»;
- датчик контура – «Пирометр 1»;
- задатчик контура – «Задатчик 1»;
- исполнительный механизм – «ИМ 1»;
- команды – «Больше», «Меньше»;
- сигнал – Разрешение управления».

Пример видеogramмы изображения на экране монитора АРМа технолога-оператора в режиме работы «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ» представлен на **рис. 1**.

Аналогично в диалоговом режиме формируются элементы всех 12 используемых контуров управления на реальной печи. После режима «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ» осуществляется операция «ГРАДУИРОВКА».

Нажатием клавиши «Г» в системе устанавливается режим «ГРАДУИРОВКА» и на экране высвечивается меню с перечнем всех зон печи с автоматическим

управлением тепловым режимом.

[illegible]

Рис. 1. Видеограмма экрана монитора АРМа при функционировании адаптивной системы в режиме «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ»

Реализация режима «ГРАДУИРОВКА» осуществляется путем последовательного выбора и выполнения следующих операций:

- выбор зоны – «Томильная Верх»;
- выбор контура управления – «Температура верха»;
- выбор параметра – «Датчик температуры»;
- выбор первой точки градуировочной характеристики датчика – «минимальное значение».

Из появившегося на экране меню с реперными (опорными) точками градуировочной характеристики датчика следует последовательно выбирать все затребованные значения, которые необходимо выставлять на датчике выбранного технологического параметра.

Величины аналоговых сигналов датчиков всех технологических параметров – X при заданных опорных значениях считываются и в виде цифровых кодов АЦП – Y записываются в базу данных и хранятся в виде градуировочных характеристик по всем информационным каналам всех контуров управления.

Любые промежуточные значения Y_T по градуировочной характеристике, заданной дискретными значениями, определяются по методу кусочно-линейной аппроксимации в соответствии с выражением

$$Y_T = Y_i + \frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{X_{i+1} - X_i} (X_T - X_i), (i=1 \dots n),$$

где n – число реперных (опорных) точек градуировочной характеристики ($n \leq 10$); X_T – текущее значение аналогового сигнала датчика контролируемого параметра; Y_T – соответствующее X_T цифровое значение контролируемого параметра в кодах АЦП; i – индекс реперной точки; $X_i, Y_i, X_{i+1}, Y_{i+1}$ – значения соответствующих параметров в i и $i+1$ фиксированных номерах реперных точек, между которыми располагается текущее значение X_T .

Режим «ГРАДУИРОВКА» позволяет адаптивной системе воспринимать как унифицированные, так и естественной формы входные информационные сигналы и выводить на экран монитора АРМа информацию, усредненную за 2–3 с, в удобном для технологического персонала виде.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ «НАСТРОЙКА»

После выполнения всех процедур подпрограммы «НАСТРОЙКА» по каждому контуру управления в базе данных формируется информация, видеокادر ко-

торой на экране монитора АРМа имеет вид, представленный на **рис. 2**. Реально операция «НАСТРОЙКА» представляет достаточно сложный технологический самый главный процесс адаптации. И это требует отдельного подробного рассмотрения конкретного решения этой задачи.

▲-ВВЕРХ	▼-ВНИЗ	ЕК-ВЫБОР	ПС-ВЫХОД
НАСТРОЙКА ТОПИЛЬНАЯ ЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ			
КОЭФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ РЕГУЛЯТОРА		XX.XX	
ВРЕМЯ ИНТЕГРИРОВАНИЯ		XXXXX	
ВРЕМЯ ПРЕДВАРЕНИЯ		XXXXXX	
ЧАСТОТА СРЕЗА ФИЛЬТРА		X.XX	
ЗОНА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ		XXX	
ЗОНА ВОЗВРАТА		XXX	

Рис. 2. Видеокادر экрана монитора АРМа после завершения процедуры «НАСТРОЙКА» по выбранному контуру управления

После вывода на экран предусмотрена возможность коррекции параметров динамической настройки каждого контура в ручном режиме путем задания соответствующих значений в процессе технологической наладки системы [7].

Адаптивный управляющий комплекс может функционировать в трех режимах: «УВМ», «АВТ», «ДИСТ».

В верхней строке экрана размещено меню допустимых действий путем нажатия определенных клавиш выбора режима.

В режиме «УВМ» заданные значения технологических параметров устанавливаются автоматически в соответствии с принятым текущим критерием управления. Технологический персонал (нагревательщики) только контролирует заданные величины на экране монитора АРМа визуально.

В режиме «АВТ» заданное значение технологического параметра для выбранного контура управления устанавливается нагревательщиком с использованием специального аналогового задатчика или цифрового в режиме «ЗАДАНИЕ» путем выполнения требуемых действий, рекомендуемых на экране монитора АРМа.

В режиме «ДИСТ» управление технологическим параметром осуществляет нагревательщик путем дистанционного управления движением исполнительного механизма с рабочего места АРМа путем команд «Больше» – «Меньше».

При выходе из строя адаптивного комплекса управления технологическим процессом по каждому используемому контуру управления осуществляется путем непосредственного управления движением исполнительного механизма в режиме «РУЧН». В случае

выбора режимов «ГРАДУИРОВКА» или «НАСТРОЙКА» по определенному контуру управления остальные контуры управления функционируют в нормальном рабочем режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате реализации программного обеспечения адаптивного управляющего комплекса обеспечивается реальная возможность осуществления самоприспособления микропроцессорной системы к технологическому автоматизируемому процессу в реальных производственных условиях.

Время технологической наладки адаптивной системы автоматизированного управления нижнего уровня, определяющего важную роль в современной АСУ ТП, на реальном объекте снижается многократно.

Благодаря объектно-ориентированной структуре программного обеспечения реально обеспечивается современный уровень управления технологическими параметрами по двенадцати каналам управления с использованием всего 32 килобайт объема оперативной памяти, используемой УВМ в комплекте с МРК – УСО.

Особенно эффективно, как с экономической, так и с технической точек зрения, применение адаптивных управляющих систем для автоматизированного управления технологическими процессами на предприятиях малого бизнеса в условиях дефицита квалифицированного персонала по технологической наладке программируемых технических микропроцессорных средств контроля и управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М.: Энергия, 1967. 232с.
2. Парсункин Б.Н., Обухов Г.Ф., Леднов А.В. Формирование тестирующих сигналов для идентификации тепло-энергетических объектов // Изв. вузов. Теплоэнергетика. 1988. №6. С.65-70.
3. Парсункин Б.Н. Определение параметров идентификации объектов металлургического производства // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. №6. С.121-125.
4. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия, 1973. 190с.
5. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие. Минск: Вышэйш. шк., 1984. 192с.
6. Парсункин Б.Н. Адаптация и оптимизация настройки контуров цифрового управления: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 1991. 134с.
7. Парсункин Б.Н., Рябков В.М., Обухов Г.Ф. Оперативное определение эффективности работы микропроцессорных систем управления технологическими процессами // Сталь. 1987. №9. С.101-105.

INFORMATION IN ENGLISH

VISUALIZATION SYSTEM FOR CREATING AN ADAPTIVE COMPLEX OF A LOCAL LEVEL CONTROL IN APCS OF INDUSTRIAL PRODUCTION

Parsunkin B.N, Bondareva A.R., Polukhina E.I.

The development results of a system of visualization the

process parameters of software adaptation of control automated

local level system to informational structure of a controlled industrial process were presented.

The structure of the information system, which is provides a software adaptation of local control loops to the real heating control process of continuously cast blank in continuous furnaces is developed.

Keywords: program realization, adaptive control system, visualization of the process, the dialog mode, the control circuit, the local level.

REFERENCES

1. Balakirev V.S., Dudnikov E.G., Tsirlin A.M. *Ekspperimental'noe opredelenie dinamicheskikh harakteristik promyshlennykh ob'ektov upravleniya* [Experimental determination of the dynamic characteristics of the industrial plants of control] Moscow: Energiya, 1967, 232 p.
2. Parsunkin B.N., Obuhov G.F., Lednov A.V. *Formirovanie testiruyushchih signalov dlya identifikatsii teploenergeticheskikh ob'ektov* [Formation of test signals for identification of thermal power objects]. *Izvestiya vuzov. Teploenergetika* [News of Higher Educational Institutions. Thermal engineering]. 1998, no. 6, pp. 65-70.
3. Parsunkin B.N. *Opredelenie parametrov identifikatsii ob'ektov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of parameters identification of objects of metallurgical production]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy]. 1998, no. 6, pp. 121-125.
4. Frer F., Ortenburger F. *Vvedenie v elektronnyu tekhniku regulirovaniya* [Introduction to the electronic equipment control]. Moscow: Energiya. 1973, 190 p.
5. Kulakov G.T. *Inzhenernye ekspress-metody rascheta promyshlennykh sistemre-gulirovaniya: spravocnoe posobie* [Engineering rapid methods of calculation of industrial control systems]. Minsk: Graduate School, 1984, 192 p.
6. Parsunkin B.N. *Adaptatsiya i optimizatsiya nastrojki konturov cifrovogo upravleniya: ucheb. posobie* [Adaptation and optimization of digital control circuit configuration: tutorial]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 1991, 134 p.
7. Parsunkin B.N., Ryabkov V.M., Obuhov G.F. *Adaptatsiya i optimizatsiya nastrojki konturov cifrovogo upravleniya* [Operational definition of the efficiency of the microprocessor systems of control of technological processes]. *Stal* [Steel]. 1987, no. 9, pp. 101-105.

УДК 004.9:338.24

Масленникова О.Е., Назарова О.Б.

ТИПОВОЙ ПРОЕКТ ВНЕДРЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Цель исследования состояла в поиске типовой структуры проекта внедрения корпоративных информационных систем, определении принципов и механизмов его эффективного проведения. В качестве примера использовалась задача внедрения типового программного решения в строительную организацию. Инициация проекта на внедрение информационной системы (ИС), независимо от ее масштаба, заставляет руководство предприятия смотреть на данные вопросы по-новому. В рамках данной работы нашли отражение ключевые позиции, которые могут упредить вопросы руководства по целесообразности предлагаемого решения о ходе проекта внедрения, продемонстрированы возможности согласования нескольких методологий внедрения для повышения эффективности данного процесса. При этом также представлены особенности внедрения КИС, анализ современных методологий внедрения, позволяющий прикоснуться к проблеме поиска столь важного баланса между корпоративными потребностями, возможностями внедряемого решения и методологией организации этого процесса.

Ключевые слова: корпоративная информационная система (КИС), внедрение, методология, проект.

Актуальность исследования определяется следующими позициями. Во-первых, эффективная организация управленческого учета на крупных предприятиях не вызывает сомнений у большинства руководителей, но решение о его автоматизации влечет за собой проблему обоснованного использования информационных технологий (ИТ) для этих целей. В связи с этим показательны результаты многих исследований, демонстрирующих 40% рубеж получения положительного эффекта от создания и внедрения информационных систем (ИС) управления предприятием. Другими словами, не наблюдается явной связи показателей прибыльности и рентабельности предприятия с внедрением программных решений в большинстве случаев автоматизации управленческого учета. Тем не менее многие западные предприятия продолжают совершенствовать свои ИС, затрачивая на это до 6% своего бюджета. Это связано, главным образом, с пониманием назначения такого рода систем как решений, являю-

щихся неотъемлемыми элементами инфраструктуры бизнеса, способных оперативно предоставлять консолидированную информацию высшему управленческому персоналу предприятия, отсутствие или недостаточная эффективность которых со временем приводит к утере конкурентоспособности или управляемости. Во-вторых, системы комплексной автоматизации управления могут быть одним из эффективных направлений инвестирования, при условии грамотного процесса их внедрения, когда запланированные доходы станут реальностью. В-третьих, принятие решения о внедрении ИТ в поддержку управленческого учета должно базироваться на готовности предприятия к такому ведению бизнеса (уровне его зрелости), результатах исследования способов, средств и механизмов такой автоматизации (тип решения, методология его внедрения).

Таким образом, цель работы состоит в поиске универсальной структуры и организации типового

проекта внедрения КИС с учетом специфики предприятия, внедряемого решения и методологии выполнения данного процесса для повышения его эффективности на примере автоматизации управления строительной организацией.

Задачи работы определены следующим образом: 1) исследовать объект информатизации с целью постановки задачи внедрения КИС; 2) проанализировать и обосновать выбор типовых КИС, а также методологий и технологий их внедрения для рассматриваемого объекта информатизации с учетом уровня его зрелости; 3) провести всестороннее исследование типовой КИС как объекта внедрения; 4) смоделировать процесс внедрения КИС в строительную организацию согласно выбранной методологии; 5) провести подбор методов расчета экономической эффективности типового проекта внедрения КИС.

Рабочая гипотеза исследования строится на предположении о том, что согласование технологии внедрения от компании 1С и методологии компании Microsoft (Microsoft Solution Framework) даст достаточный эффект в сокращении времени и стоимости внедрения при сохранении его типичности для ряда компаний.

Теоретическую и методологическую базу исследования составили работы: методология системного анализа, оценки систем на основе качественных и количественных шкал, управления в ИС (В.С. Анфилатов, В.Н. Бугорский, А.А. Емельянов и др.); исследования в области управления организационным обеспечением при внедрении ИС, реализации технико-экономических результатов внедрения ИС, оценки эффективности ИТ: L. Galoppin, C.F. Gibson, A. MacAffee, L. и др., а также исследования и работы отечественных ученых: В.С. Анфилатова, Г.Н. Калянова, И.П. Норенкова, И.Н. Омельченко, А.Е. Сатуниной, Куприянова Ю.В., Грекула В.И. и др; исследования понятия «модель зрелости» предприятия и методов определения соответствующих им уровней (Г.Н. Калянов, У. Хамфри (WattsHumphrey) и др.).

На сегодняшний день работа над исследованием ведется в направлении решения первых четырех задач. Представим некоторые позиции, характеризующие полученные результаты.

Понятие КИС носит комплексный характер. Главная задача КИС состоит в эффективном управлении всеми ресурсами предприятия (материально-техническими, финансовыми, технологическими и интеллектуальными) для получения максимальной прибыли и удовлетворения материальных и профессиональных потребностей всех сотрудников предприятия [5].

При этом задача внедрения ИС заключается в адаптации и запуске в продуктивную эксплуатацию всех ее элементов. Кроме того, это всегда проект, в результате реализации которого за ограниченное время с использованием выделенных ресурсов необходимо обеспечить запуск и функционирование некоторой ИТ для поддержки определенной деятельности предприятия. Важно, чтобы организация такой работы и управление ею осуществлялась на основе известных стандартов управления проектами. В этом ключе методология внедрения дает несколько преимуществ: 1)

обеспечение базы для обучения новых сотрудников стандартным методам внедрения – быстрота подготовки внедренческих ресурсов; 2) сокращение внутренних расходов на организацию и реализацию проектов; 3) эффективность совместного использования ресурсов между проектами, командами. Следует понимать, что любая методология внедрения должна включать в себя структурирование комплекса работ (указание фаз, этапов, задач); правила управления внедрением (управления проектом); построение команды внедрения (центр компетенции).

Любой проект внедрения, особенно крупных систем, должен основываться на обобщенных принципах, которые в конечном счете и реализованы в современных методологиях: выполнение оценки эффективности внедрения за счет отдачи инвестиций; строгое соблюдение утвержденных плана и графика без добавления в систему новых необязательных требований и возможностей; всесторонний анализ и моделирование бизнес-процессов предприятия-заказчика на начальных этапах проекта; реализация внедрения помодульно; обеспечение тесной обратной связи с заказчиком; выполнение работ по анализу существующей программно-аппаратной платформы (исследование вопросов интеграции, конвертации) [4].

Сегодня большое распространение получили такие следующие методологии внедрения: ASAP (Accelerated SAP); Oracle E-BusinessSuite: AIM и PJM; OnTarget; OneMethodology, MBS (MicrosoftBusiness), MSF (MicrosoftSolutionsFramework), MicrosoftDynamics, 1С. Был проведен сопоставительный анализ всех обозначенных решений вопроса организации процесса внедрения на предмет соблюдения указанных принципов и характеристик. В табл. 1 приводится пример сопоставления методологии MSF и технологии внедрения от 1С, который объясняется особенностями выбранной для исследования предметной области.

Сравнительная характеристика позволила сделать следующие выводы. Во-первых, методология MSF носит более универсальный характер и подходит для организации проекта внедрения любой сложности для любого типа программного решения, когда как технология внедрения 1С ориентирована на продукты данной компании. Во-вторых, полноценное документирование всех этапов внедрения на русском языке от 1С является неотъемлемым преимуществом. В-третьих, компактное представление фаз и этапов от MSF может способствовать сокращению сроков проекта, а значит, экономии ресурсов проекта. В связи с этим, выдвигается предположение, что их согласование даст необходимый эффект для предприятия.

Это предположение строится на том факте, что достаточно полно разработанные технологии внедрения от 1С все же носят рекомендательный характер, имеют ориентацию на решения только данной компании, предполагают адаптацию к условиям и специфике предприятия. Таким образом, полагаем возможным проведение адаптации за счет привлечения дисциплин методологии MSF.

Остановимся на представлении предметной области, на примере решения проблем которой и строятся основные предположения исследования.

Строительная организация работает с различного

Таблица 1

Сопоставительная характеристика методологий внедрения

Позиции для сравнения	MSF	1С
Масштабируемость (типы систем/ уровень внедрения)	Любой тип ИС/ нет	Программные решения компании 1С/ Уровень отдела, уровень предприятия
Типология процесса внедрения	Поддержка 5 видов дисциплин «Модель процессов MSF»; «Модель проектной группы MSF»; «Дисциплина управления проектами MSF»; «Дисциплина управления рисками MSF»; «Дисциплина управления подготовкой MSF»	Поддерживаются технология стандартного внедрения; технология быстрого результата; технология корпоративного внедрения
Особенность методологии	База знаний по осуществлению любых проектов	Направленность на минимизацию затрат и времени; тесная интеграция задач внедрения с задачами управления проектом
Степень «покрытия» рекомендуемых этапов внедрения/ «структуры методологии»	Полная/полная	Полная/частичная
Указание на конкретные результаты по фазам	Полное, по всем фазам и задачам	Полное, по всем фазам и задачам
Реализация принципов внедрения КИС	Возможность полной реализации принципов, за счет наличия четких указаний по действиям и предполагаемым результатам	Этапы достаточно подробны, но указания по их выполнению распространяются только для представителей организации-внедренца
Стабильность представления методологии	Во всех источниках одинаковое представление фаз, задач, результатов	Стабильности в представлении нет из-за интерпретации технологических этапов под особенности предприятия, на которое осуществляется внедрение

рода объектами: жилые дома, больницы, школы, мосты, дороги и т.д., осуществляя свою деятельность по договорам с заказчиками (городская администрация, ведомства, частные и т.д.). Структурно строительная организация состоит из строительных управлений, каждое из которых ведет работы на одном или нескольких участках, возглавляемых начальниками, которым, в свою очередь, подчиняется группа прорабов, мастеров и техников.

Технология строительства того или иного объекта предполагает выполнение определенного набора видов работ, необходимых для сооружения данного типа объекта. Для организации работ на объекте составляются графики работ, смета. По результатам выполнения работ составляется отчет с указанием сроков выполнения работ и фактических расходов материалов.

В целом для организации можно выделить следующие бизнес-поток: коммерческий, связанный с продажей продукции; производственный – выполнение заказов (постройка и ремонт); учетно-финансовый – бухгалтерский учет, финансы, управленческая отчетность.

В организации имеется система инструментальной поддержки бизнеса, представленная совокупностью программно-аппаратных средств. Отдельного внимания требует именно программная её составляющая: общее ПО (для работы системы предприятия в целом – ОС (Windows 7, Windows Server 2011), антивирусное ПО (антивирус Касперского 2012), офисные приложения (MS Office)); программные решения спе-

циализированного назначения – гранд-смета; 1С: Зарплата и кадры; гидравлический калькулятор; AutoCad 2013; 1С: Бухгалтерия 8.2; 1С: Предприятие 8.2.

Руководство организации приняло решение о комплексной автоматизации строительства – основного бизнес-процесса. При этом было сформулировано положение об образе проекта внедрения со стороны заказчика.

Для руководства строительной организации (финансового директора, директора по персоналу, главного бухгалтера, генерального директора, главного инженера) внедряемое программное решение должно представлять средство комплексной автоматизации строительства, то есть полностью автоматизировать различные участки строительного процесса по всем циклам управления: финансы, производство, ресурсы, персонал и др. В отличие от действующих сейчас разрозненных систем для решения отдельных задач предприятия внедряемое решение должно стать единым информационным пространством для эффективного управления. Это должна быть система класса ERP, которая обеспечит реализацию всех задач управления от бизнес-планирования, управления затратами управления проектами, составления смет, а также иметь относительно короткие сроки внедрения и невысокую стоимость.

При сформированном видении руководством необходимого для внедрения средства важно определить, что компания готова к плановой модернизации или обновлению. Для этих целей было привлечено понятие

«модели зрелости» (MaturityModels (ММ)).

Методом мозгового штурма, экспертных оценок, а также используя рекомендации ученых [2, 3], были определены следующие уровни зрелости предприятия.

Уровень технологической зрелости компании согласно Модели Технологической Зрелости (CapabilityMaturityModelIntegrated, СММИ) был определен как «стандартное управление проектами». Уровень зрелости ИТ-инфраструктуры компании согласно модели зрелости ИТ-инфраструктуры, разработанной Microsoft, можно определить как базовый. Уровень зрелости компании в области применения ИТ – первый. Уровень зрелости системы развития и обучения персонала соответствует первой стадии – администрирование процесса обучения.

Необходимо скорректировать образ решения проекта внедрения КИС для данной компании соответственно её уровню зрелости. Для перехода организации на более высокий уровень зрелости по всем перечисленным моделям требуется: 1) целесообразно включать единство технологий, инструментария, процедур, способов осуществления всех бизнес-процессов, и по-

скольку достаточно большое количество процессов предприятия использует решения от 1С, необходимо в первую очередь рассматривать предложения данной компании относительно автоматизации основного бизнес-процесса; 2) использовать стандартные процессы управления проектами, в том числе для проекта внедрения (необходимо руководствоваться стандартизированными технологиями и методологиями внедрения); 3) стремиться к снижению рисков, связанных с безопасностью; 4) использовать программное решение, позволяющее максимально автоматизировать ручные и длительно выполняемые операции, внедрять передовой опыт, а также планировать наращивание функциональности и расширение контуров внедрения; 5) для выполнения проекта внедрения нанимать профессионалов, продумывать стратегию обучения персонала.

Следующим шагом в решении проблемы стал анализ готовых КИС для решения проблем организации, подходящих под сформированный образ. По результатам анализа, представленным в **табл. 2**, выбор был сделан в пользу «1С: Управление Строительной организацией 8».

Таблица 2

Сравнение программных решений для управления строительной организацией

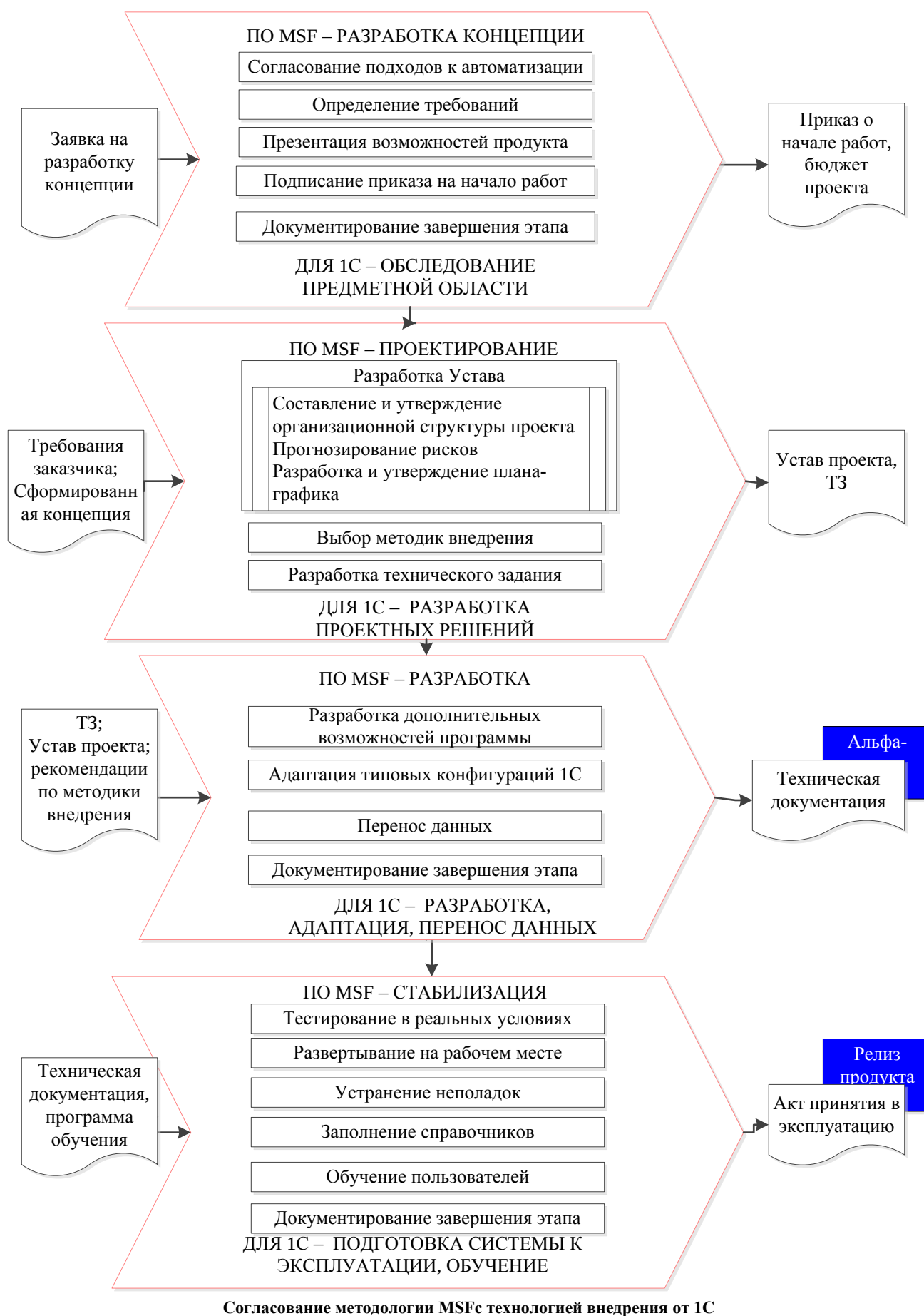
Параметр сравнения	Система			
	Галактика ERP, модуль «Управление строительством»	Ланит-строительство	Строительные решения («Алеф»)	1С: Управление строительной организацией 8
Бюджетирование	В самом модуле - нет, в системе - да	Да	Да	Да
Управление затратами	Да	Да	да + интеграция с Primavera	Да
Управление договорами	Да	Да	Да	Да
Управление проектами	Интеграция с Primavera и MS Project	Да	Да	Да
Составление смет	Интеграция со сметными программами	Выгрузка WinSmeta	да	Да+выгрузка др. сметных программ
Управление снабжением	Да	Да	Да	Да
Бизнес-планирование	Да	Да	Да	Да
Управление кредитами	Да	Да	нет	нет
Бухгалтерский учёт	Да	Да	Да	Да
Сроки внедрения	От 3-6 мес. до 2-3 лет	От 3-х мес. до 1,5 лет	6-9 мес.	От 3 мес.
Цена, руб.	570 412	471 124	321 014	540 687

Первое приближение в решении задачи моделирования процесса внедрения КИС в строительную организацию согласно выбранной методологии для доказательства выдвинутой гипотезы было сделано в виде построения модели сопоставления технологии внедрения от 1С и методологии MSF (см. **рисунок**).

Данная модель требует расчетной части, позволяющей продемонстрировать преимущества того или иного решения в организации и воплощении проекта внедрения.

В качестве заключения отметим достигнутые на сегодня результаты и представим необходимые в ближайшей перспективе решения. На сегодняшний день можно говорить, что цель исследования пока не дос-

тигнута. Тем не менее, образ типового проекта сформирован. В него должны быть включены следующие позиции: 1) концепция внедрения КИС, построенная с учетом уровня зрелости предприятия; 2) обоснованный подбор программного решения и методологии его внедрения; 3) модель согласования методологий внедрения (по необходимости, исходя из особенностей предметной области), включающая расчеты эффективности каждого из предлагаемых решений; 4) реализация проектных решений, изложенных в концепции согласно положениям выбранной методологии внедрения; 5) обобщенная оценка эффективности проектных решений.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грекул В.И., Коровкина Н.Л., Денищенко Г.Н. Управление внедрением информационных систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/itmngt/isimman/> (дата обращения: 23.02.2015).
2. Управление развитием информационных систем: учеб. пособие для вузов / Г.А. Левочкина, Г.Н. Калянов, Р.Б. Васильев; под ред. Г.Н. Калянова. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 376 с.
3. Назарова О.Б., Давлеткиреева Л.З., Малахова И.В.

Аудит информационной инфраструктуры компании и разработка ИТ-стратегии: монография. – Магнитогорск: МаГУ, 2012. 224 с.

4. Особенности внедрения КИС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hr-portal.ru/article/osobennosti-vnedreniya-kis> (дата обращения: 23.02.2015).

5. Сопровождение корпоративных информационных систем: учебник / О.Б. Назарова, Л.З. Давлеткиреева, О.Е. Масленникова, Н.О. Пролозова. Магнитогорск: МаГУ, 2013. 220 с.

INFORMATION IN ENGLISH

GENERIC PROJECT OF IMPLEMENTATION THE CORPORATE INFORMATION SYSTEM FOR BUILDING ORGANIZATIONS

Maslennikova O.Ye, Nazarova O.B.

The aim of the study was to find the typical structure of the project implementation of corporate information systems, to define the principles and mechanisms for its effective realization. The task of implementation the standard software solutions in the construction company used as an example. Initiation of a project for the implementation of an information system (IS), irrespective of its size, makes the company's management to look at these issues in a new way. Within the context of this work the main points, which can preempt the management questions by the practicability of proposed solution of project implementation progress, were in the picture. The abilities of coordination a several implementation methodologies for increasing the efficiency of this process were demonstrated. It also presents the features of the implementation the EIS, the analysis of modern implementations methodologies, which allow to touch the problem of finding an important balance between the corporate needs, the abilities of implementation solution and methodology of this process organization.

Keywords: Corporate Information System (EIS), implementation, methodology, project.

REFERENCES

1. Grekul V.I., Korovkina N.L., Denishhenko G.N. *Upravlenie vnedreniem informacionnyh sistem* [Management of the information systems implementation]. Mode of access: <http://www.intuit.ru/department/itmngt/isimman/>.
2. Vasil'ev R.B., Kaljanov G.N., Ljovochkina G.A. *Upravlenie razvitiem informacionnyh sistem: ucheb.posobie dlja vuzov* [Managing the development of information systems: Text-books for high schools]. Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2009, 376 p.
3. Nazarova, O.B., Davletkireeva, L.Z., Malahova, I.V. *Audit informacionnoj infrastruktury kompanii i razrabotka IT-strategii: monografija* [Audit company's information infrastructure and development of IT - strategy: monograph]. Magnitogorsk. MSU, 2012, 224 p.
4. *Osobennosti vnedrenija KIS* [Features of the implementation the EIS]. Mode of access: <http://www.intuit.ru/department/itmngt/isimman/>.
5. Nazarova O.B., Davletkireeva L.Z., Maslennikova O.E., Prolozova N.O. *Soprovozhdenie korporativnyh informacionnyh sistem: uchebnik* [Maintenance of corporate information systems]. Magnitogorsk. MSU, 2013, 220 p.

Информация о других журналах издательства

Журнал «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах» основан в 2011 году на базе сборников, которые издавались в период работы кафедры вычислительной техники и прикладной математики (с 2013 кафедры вычислительной техники и программирования): 2003 и 2004 годах – сборник трудов «Новые программные средства для предприятий Урала», в 2005 и 2007 годах – «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации»; в 2006 – «Разработка новых программных средств для предприятий Урала».

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам: технические средства обеспечения информационных процессов; обыкновенные дифференциальные уравнения и дифференциальные уравнения с частными производными; математические модели естественных и технических наук; уравнения математической физики; теория систем автоматического управления; теория моделирования; теория информации; искусственный интеллект; системный анализ; общие вопросы автоматики и вычислительной техники; теория автоматического управления; теоретические основы программирования; вычислительные сети; программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей; системы автоматического управления, регулирования и контроля; автоматизированные системы управления технологическими процессами; автоматизация проектирования; автоматизация научных исследований; педагогика и методика подготовки кадров высшей квалификации в области математики, программирования, разработки автоматизированных систем и информационных технологий.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВПО «МГТУ» www.mgtu.ru (раздел «Журнал «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах»);
- на платформе eLIBRARY.

УДК 681.5

Парсункин Б.Н., Обухов Г.Ф., Обухова Т. Г., Ахметова А.У.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО КОНТУРА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В работе представлена математическая модель синтеза цифрового контура автоматического управления, программно реализованного с использованием ограниченного объема используемой оперативной памяти микропроцессорного регулирующего контроллера (МРК).

Ключевые слова: типовой закон управления, сигнал рассогласования, дискретные аналоги производных, предыстория управления, управляющее воздействие.

Современные универсальные программно-конфигурируемые системы централизованного автоматизированного управления производственными процессами по экономическим условиям часто просто недоступны для специализированных предприятий отечественного малого и среднего бизнеса.

Обеспечение конкурентности и внешней импортной независимости производимой специализированными малыми предприятиями продукции возможно при использовании малозатратных объектно-ориентированных адаптивных свободно программируемых систем централизованного управления технологическими процессами.

В данной работе рассмотрен вариант эффективной программной малозатратной реализации типового стабилизирующего контура управления для централизованного процесса с использованием управляющего вычислительного комплекса (УВК) на базе микроЭВМ.

Уравнения типового ПИД-закона управления в аналоговой форме имеет вид:

$$Y(\tau) = Y_0 + K_p \left(E(\tau) + \left(\frac{1}{T_{из}} \right) \cdot \int_0^{\tau} E(\tau) d\tau + T_{II} \frac{dE(\tau)}{d\tau} \right), \quad (1)$$

где $Y(\tau)$, Y_0 – соответственно текущее и начальное положение выходного вала исполнительного механизма (или регулирующего органа), % хода; $E(\tau) = X_3(\tau) - X(\tau)$ – сигнал рассогласования между текущими заданным $X_3(\tau)$ и действительным $X(\tau)$ значениями управляющего технологического параметра; τ – текущее время, с; K_p , $T_{из}$, T_{II} – соответственно параметры динамической настройки стабилизирующего контура управления: коэффициент передачи, % хода/ед. рассогласования, время изодрома, с; время предварения, с.

Выражение (1) может быть представлено в общем случае в виде уравнения:

$$Y(\tau) = Y_0 + K_p \int_0^{\tau} \left[T_{II} \frac{d^2 E(\tau)}{d\tau^2} + \frac{dE(\tau)}{d\tau} + \frac{E(\tau)}{T_{из}} \right] d\tau + K_p \left(E_0(\tau) + T_{II} \left(\frac{dE}{d\tau} \right)_0 \right), \quad (2)$$

где $E_0(\tau)$ и $\left(\frac{dE(\tau)}{d\tau} \right)_0$ – соответственные значения параметров в начальный при $\tau=0$ момент времени, если процесс не находится в установившемся состоянии.

Если при $\tau \leq 0$ управляемый процесс находится в установившемся состоянии, то $E_0(\tau)$ и $\left(\frac{dE(\tau)}{d\tau} \right)_0$ равны нулю.

В системах автоматического управления технологическими параметрами используются исполнительные механизмы (ИМ) постоянной скорости. Положение выходного вала ИМ может быть в любой текущий момент времени определено в соответствии с выражением

$$Y(\tau) = Y_0 + K_{им} \int_0^{\tau} S(\tau) dt, \quad (3)$$

где $S(\tau) \in \{-1, 0, 1\}$ – сигнум (знаковая) функция, определяющая текущее состояние ИМ: +1 – движение в направлении увеличения $Y(\tau)$, -1 – движение в направлении уменьшения $Y(\tau)$, 0 – остановка ИМ, т.е. $Y(\tau) = \text{const}$; $K_{им}$ – реальная постоянная скорость исполнительного механизма по технической характеристике, %хода/с.

Принцип работы свободно программируемого стабилизирующего контура управления, при условии использования ИМ постоянной скорости, можно выразить соотношением

$$\delta(\tau) = (E_0(\tau) - T_{II} \cdot V_0) + \int_0^{\tau} \left[T_{II} \cdot W(\tau) + V(\tau) + \frac{1}{T_{из}} E(\tau) - C_{св} \cdot S(\tau) \right] dt, \quad (4)$$

где $\delta(\tau)$ – текущее значение функции ошибки реализации ПИД-закона управления; $V(\tau)$, $W(\tau)$ – текущие цифровые значения «реальных» величин соответственно первой и второй производных $E(\tau)$ по времени τ ; $C_{св} = K_{им} / K_p$ – скорость связи реального контура управления.

Управляющий вычислительный комплекс должен так управлять ИМ во всех используемых контурах управления, чтобы функции ошибки $\delta_i(\tau)$ были мини-

малыми (практически нулевыми).

Здесь $i=10\div 12$ – число используемых контуров в системе управления технологическим процессом.

В случае наиболее удобном для практической реализации можно потребовать от автоматической системы централизованного управления выполнения следующего условия по каждому контуру:

$$S_i(\tau) = \text{Sign} [\delta i(\tau)]. \quad (5)$$

Рассматриваемый метод программной реализации цифрового типового (ПИД) закона управления в соответствии с (4), (5) возможно является не самым лучшим способом приближения к идеальному аналоговому закону, но практическая выгода от удобства ее реализации в производственных условиях очевидна, поскольку не требует использования процедуры цифро-импульсного преобразования при формировании управляющего сигнала.

Для предотвращения возможного возникновения автоколебательного режима переключение управляющего воздействия $S(\tau)$ по условию (5) осуществляется с учетом зоны нечувствительности δ_1^* и гистерезиса δ_2^* в соответствии с условием:

$$\begin{aligned} &+1, \text{ при } \delta(\tau) > \delta_1^*, \\ S(\tau) = &0, \text{ при } |\delta(\tau)| \leq |(\delta_1^* - \delta_2^*) + \delta_1^*|, \\ &-1, \text{ при } \delta(\tau) < -\delta_1^*, \end{aligned} \quad (6)$$

где δ_1^* – заданная величина зоны нечувствительности релейного элемента (данные хранятся в базе индивидуально для каждого i -го элемента контура управления); δ_2^* – заданная зона гистерезиса для i -го элемента контура управления.

Для перехода к цифровой (дискретной) форме представления преобразуем выражение (4), заменив интеграл суммой, а все аналоговые параметры дискретными:

$$\begin{aligned} \delta_i^* = &E_0 + T_{\Pi} V_0 + \\ &+ \Delta\tau \sum_{k=1}^i T_{\Pi} W_k + V_k + \frac{1}{T_{\text{из}}} E_k - C_{\text{св}} S_k; \\ p \in &(\delta_1, E, V, W, S)^i; \end{aligned} \quad (7)$$

$$p \in p(\tau), \text{ при } \tau = K \cdot \Delta\tau_i; \quad K = 0, 1, 2, \dots, i,$$

$\Delta\tau$ – принятый цикл работы управляющего вычислительного комплекса (УВК).

Для повышения точности определения управляющего воздействия осуществим масштабное преобразование в соответствии с выражением

$$\delta_i = \delta_i^* \cdot L_m / (C_{\text{св}} \cdot \Delta\tau_i), \quad (8)$$

где $L_m = 100 = \text{const}$ – целочисленный масштабный коэффициент.

После масштабного преобразования (8) получим:

$$\begin{aligned} \delta_i = &\frac{L_m}{\Delta\tau_i C_{\text{св}}} (E_0 + T_{\Pi} V_0) + \\ &+ \sum_{k=1}^i \frac{L_m}{C_{\text{св}}} \left(T_{\Pi} W_k + V_k + \frac{1}{T_{\text{из}}} E_k \right) - L_{\Pi} S_k. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) может быть представлено в рекуррентной форме вида:

$$\begin{cases} \delta_0 = \frac{L_m}{\Delta\tau_i} (E_0 + T_{\Pi} V_0) \\ \delta_k = \delta_{k-1} + \frac{L_m}{C_{\text{св}}} \left(T_{\Pi} W_k + V_k + \frac{1}{T_{\text{из}}} E_k \right) - L_{\Pi} S_k, \end{cases} \quad (10)$$

Для формирования дискретного (цифрового) аналога ПИД-закона управления необходимо осуществлять вычисление трех сумм, используя множества заполненных сигналов рассогласования, рассредоточенных во времени:

$$\begin{cases} S_{1k} = S_{1k-1} + Z_k - Z_{k-m} \\ S_{2k} = S_{2k-1} + Z_k - Z_{k-2m} \\ S_{3k} = S_{3k-1} + Z_k - Z_{k-3m} \end{cases}, \quad (11)$$

где S_{1k} , S_{2k} , S_{3k} – соответственно первая, вторая и третья суммы в k -й момент времени; Z_k – вычисленное в k -й момент времени значение сигнала рассогласования контура управления; k – текущий момент времени; m – количество суммируемых элементов $m \leq (128/3) \approx 42$.

Количество суммируемых элементов определяется принятым значением постоянной времени цифрового фильтра ТФ:

$$m = 1 + \frac{T_{\Phi}}{\tau_{\Phi}}; \quad T_{\Phi} \leq 42\tau_{\Phi}, \quad (12)$$

где T_{Φ} – время, за которое происходит усреднение сигнала рассогласования, т.е. вычисляется его среднее значение.

Расчет величин рассогласования E_k при реализации цифрового закона управления осуществляется УВК в соответствии с выражением

$$E_k = \frac{1}{M} (K_1 \cdot S_{1k} + K_2 S_{2k} + K_3 S_{3k}), \quad (13)$$

где E_k – дискретный аналог сигнала рассогласования; K_1, K_2, K_3 – весовые коэффициенты, связанные условием.

$$K_1 + K_2 + K_3 = 1; \quad \frac{K_1}{K_2} = \frac{K_2}{K_3} = 1 + M, \quad (14)$$

где M – показатель ослабления весовых коэффициентов или коэффициент предыстории.

$$\text{При } M=0 \quad K_1 = K_2 = K_3 = \frac{1}{3};$$

$$M=1 \quad K_1 = 4/7; K_2 = 2/7; K_3 = 1/7;$$

$$M=2 \quad K_1 = 9/13; K_2 = 3/13; K_3 = 1/13.$$

Вычисление первой производной сигнала рассогласования V_k осуществляется в соответствии с выражением:

$$V_k = \frac{1}{m^2 \tau \phi} [l_1 (S_{1k} - S_{2k}) + l_2 (S_{2k} - S_{3k})], \quad (15)$$

где l_1, l_2 – весовые коэффициенты, связанные условием

$$l_1 + l_2 = 1; \quad l_1 / l_2 = 1 + M, \quad (16)$$

$$\text{При } M=0, \quad l_1 = l_2 = 1/2; \quad M=1, \quad l_1 = 2/3; l_2 = 1/3; \quad M=2, \\ l_1 = 3/4; l_2 = 1/4.$$

Величина коэффициента предыстории M является параметром настройки цифрового контура управления и реально определяет степень влияния предыдущих значений сигнала рассогласования на формирование управляющего воздействия в текущий момент времени. Поскольку сигналы рассогласования первой и второй производных рассчитываются программно и разнесены во времени, то наибольший вес при формировании значений этих сигналов имеют величины текущих значений сигналов.

Вычисление значения второй производной W_k в цифровом контуре управления осуществляется в соответствии с выражением

$$W_k = \frac{1}{m^3 \tau^2 p} (S_{1k} + 2S_{2k} - S_{3k}). \quad (17)$$

С учетом ранее сказанного после соответствующих преобразований текущее значение функции ошибки δ_k вычисляется по формуле

$$\delta_k = \delta_{k-1} + C_1 S_{1k} + C_2 S_{2k} + C_3 S_{3k} - L_m S_k. \quad (18)$$

где

$$C_1 = \frac{T_{II} \cdot L_m}{m^3 C_{CB} \cdot \eta_{зд}} + \frac{(1+m)L_m}{(m+2) \cdot m^2 C_{CB}} + \quad (19)$$

$$+ \frac{(1+m)^2 \cdot L_m \cdot n_{зд}}{T_{из} \cdot m \cdot C_{CB} (3+3m+m^2)},$$

$$C_2 = \frac{(1+m)^2 \cdot L_m \cdot n_{зд}}{T_{из} \cdot m \cdot C_{CB} (3+3m+m^2)} - \quad (20)$$

$$- \frac{m \cdot L_m}{m^2 (m+2) C_{CB}} - \frac{2T_n \cdot L_m}{\eta_{зд} m^2 C_{CB}},$$

$$C_3 = \frac{T_{II} \cdot L_m}{\eta_{зд} m^2 C_{CB}} - \frac{L_m}{(2+m)m^2 C_{CB}} + \quad (21)$$

$$+ \frac{\eta_{зд} \cdot L_m}{T_{из} \cdot m \cdot C_{CB} (3+3m+m^2)},$$

где $T_{II}, T_{из}$ – соответственно время предварения и время изодома, равное отношению периода опроса датчиков

(1 с) к периоду таймера (0,2 с), в рассматриваемом случае принято $\eta_{зд} = 5$.

Влияние составляющей δ_0 даже в момент неустановившегося режима можно не учитывать, так как влияние этого параметра ощутимо только в первые 5-6 с работы контура.

Для обеспечения устойчивой работы цифрового контура управления при формировании переключательной функции S_k кроме условия (6) накладываются дополнительные ограничения на величины δ_1 и δ_2 :

$$\delta_1 > \delta_2, \quad (22)$$

$$|2\delta_1| > L_m \cdot S_k. \quad (23)$$

При реализации цифровых ПИ и ПИД законов управления память УВК распределяется следующим образом. Информация о конфигурации каждого контура управления и заданные значения технологических параметров этих контуров хранится в массиве параметров настроек. Информация о номерах датчиков и задатчиков и их реальных градуировочных характеристиках всех используемых контуров управления хранится в массиве датчиков. Отмеченные массивы в память УВМ записываются (загружаются) в процессе начального диалога с УВК одновременно с управляющей программой с монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) и технолога оператора.

Вычисление сумм S_{1k}, S_{2k}, S_{3k} и фильтрация данных осуществляется в массиве фильтрации. Информация о суммах, величинах коэффициентах C_1, C_2, C_3 и требуемых направлениях ходов исполнительных механизмов всех контуров управления хранится в массиве переменных данных.

В общем виде прямое цифровое управление при программно реализованном адаптивном централизованном управлении осуществляется в соответствии с алгоритмами: начального диалога; ввода сигналов с датчика дискретных и аналоговых датчиков и задатчиков; расчета сигналов рассогласования; расчета сигнала ошибки; расчета ходов исполнительных механизмов и сигнала обратной связи.

Подробное описание работы блок-схем каждого алгоритма приведено в работах [1, 2].

Достоинством разработанной управляющей программы, функционирующей в реальном масштабе времени, является минимизация времени использования прерываний и возможность выполнения расчетов хода ИМ в каждом такте.

Блочное построение управляющей программы обеспечивает многократное использование одних и тех же блоков. Синхронизация в массивах осуществляется по задачам, а не по системам. Это позволило реально осуществить управление тепловым режимом методической печи по 12 контурам с использованием УВК, имеющего объем оперативной памяти всего в 32 кбайта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самонастраивающаяся система для управления тепловым режимом печей / Б.Н. Парсункин, Д.Г. Шестеркин, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1987. №11.

2. Автоматическая система прямого цифрового управления нагревом металла / Б.Н. Парсункин, Д.Г. Шестеркин, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1985. №3.

3. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. №2. С.18-29.

4. Рябчиков М.Ю., Андреев С.М., Рябчикова Е.С. Алгоритмы и способы самонастройки средств регулирования в современных микропроцессорных контроллерах: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 136 с.

5. Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, С.М. Андреев,

и др. // Автоматизация в промышленности. 2010. №11. С.32-37.

6. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства: монография / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов. Магнитогорск: Полиграфия, 2012. 406 с.

7. Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова, Галдин М.С., Ахметов Т.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4. С. 68–71.

8. Адаптивная система автоматического управления стохастическими нелинейными процессами / Н.А. Головкин, О.С. Логунова, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Научное обозрение. 2013. №1. С.166-170.

INFORMATION IN ENGLISH

A MATHEMATICAL MODEL OF ACTIVE STABILIZER CIRCUIT FOR DIGITAL CENTRALIZED AUTOMATIC CONTROL TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Parsunkin B.N., Obukhov G.F., Obukhova T. G., Ahmetova A.U.

A mathematical model of a digital loop automatic control synthesis, which is implemented in software using limited volume of the random access memory of microprocessor regulating controller (MRC), is provided.

Keywords: the model law of management, a mismatch signal, discrete analogs of derivatives, prehistory of management, the control action.

REFERENCES

1. Parsunkin B.N., Shesterkin D.G., Obukhov G.F. and others. *Samonastravayushchaya sistema dlya upravleniya teplovym rezhimom pechej* [Self-adjusting system for control of conditions of furnaces]. *Stal'* [Steel]. 1987, no.11.

2. Parsunkin B.N., Shesterkin D.G., Obukhov G.F. and others. *Avtomaticheskaya sistema pryamogo cifrovogo upravleniya nagrevom metalla* [Automatic system of direct digital control of metal heating]. *Stal'* [Steel]. 1985, no.3.

3. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Sistema optimal'nogo upravleniya teplovym rezhimom promyshlennykh pechej* [Optimal control system of industrial furnace thermal rate]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2013, no. 2, pp. 18-29.

4. Ryabchikov M.Yu., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. *Algoritmy i sposoby samonastroyki sredstv regulirovaniya v sovremennykh mikroprocessornykh kontrollerakh: uchebnoye posobie* [Algorithms and methods for self-adjusting of control ways in a

modern microprocessor controllers: textbook]. *Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2012, 136 p.

5. Pol'ko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.YU., Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Algoritmy nechetkogo upravleniya dlya sinteza cifrovyykh konturov avtomaticheskoy stabilizatsii tekhnologicheskikh parametrov* [Fuzzy control algorithm for synthesis of a digital loop technological parameters automatic stabilization]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Industrial automatization]. 2010, no. 11, pp. 32-37.

6. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokal'nye stabiliziruyushchie kontury avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva: monografiya* [Local stabilizing loop of automatic control in industrial production ACS: monography]. *Magnitogorsk. Poligrafiya*, 2012, 406 p.

7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Obukhova T.G., Galdin M.S., Ahmetov T.U. *Adaptivnye statisticheskie modeli, sintezirovannye na osnove INS* [The adaptive statistical models, synthesized on the basis of the neural networks]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 68-71.

8. Golovko N.A., Logunova O.S., Parsunkin B.N., Andreev S.M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya stokhasticheskimi nelinejnymi processami* [Adaptive automatic control system of stochastic nonlinear processes]. *Nauchnoye obozrenie* [Science Review]. 2013, no. 1, pp. 166-170.

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 37:316.31.4

Курзаева Л.В.

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ЛИЧНОСТИ
В РАМКАХ ФОРМАЛЬНОГО, НЕФОРМАЛЬНОГО И ВНЕФОРМАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ**

Статья освещает опыт разработки региональной рамки квалификаций, которая определяет требования к результатам обучения личности через знания, умения и компетенции на разных квалификационных уровнях. Рассмотрены особенности ее разработки, определена степень согласованности с национальной рамкой квалификаций, приведены пути достижения квалификационных уровней посредством формального, неформального и внеформального обучения. Представлены фрагменты требований региональной рамки квалификаций к результатам обучения на квалификационных уровнях, соответствующих уровням оконченного бакалавриата и магистратуры, а также инструментария психологической диагностики их достижения в части качеств личности. Результаты исследования могут представлять интерес для проектов, посвященных развитию отечественной системы квалификации, в том числе по направлениям, связанным с построением адекватной требованиям рынка труда и образовательного сообщества системы аттестации выпускников образовательных учреждений профессионального образования и сертификации работников предприятий.

Ключевые слова: рамка квалификаций, компетентностный подход, формальное обучение, неформальное обучение, внеформальное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема модернизации отечественной системы квалификаций активно решается последние десять лет. К причинам пристального внимания к данной проблеме можно отнести как изолированность развития системы образования и рынка труда друг от друга, так и вхождение Российской Федерации в Болонский процесс.

При этом утверждать, что эта проблема присуща только российской действительности, нельзя. Это можно подтвердить инициированием и активной разработкой европейскими странами национальных систем квалификаций, а также разработанными и принятыми на международном уровне европейскими рамками квалификаций для высшего образования и для обучения в течение всей жизни. Все разработки национальных рамочных структур сориентированы на интеграцию с международными рамками квалификаций на базе компетентностного подхода [6, 7].

В России в 2008 г. объединенными усилиями Федерального института развития образования Министерства образования и науки РФ и Национального агентства развития квалификаций Российского союза промышленников и предпринимателей [4] разработана национальная рамка квалификаций Российской Федерации, которая призвана гармонизировать требования рынка труда и системы образования на разных квалификационных уровнях.

Данный документ носит рекомендательный характер и, по мнению разработчиков, позволяет, помимо прочего, определить общие требования к квалификации в профессиональных и федеральных государственных образовательных стандартах.

Рамка квалификаций любого уровня (международного, национального, регионального, отраслевого) является системообразующим элементом реализации концепции обучения в течение всей жизни, который позволяет обеспечить прозрачность и понятность определенных уровней квалификаций на основе согласованных требований рынка труда и системой образования. Требования к результатам обучения, указанные в

рамке квалификаций, могут служить основой для разработки системы аттестации по итогам получения формального, а также сертификации по итогам неформального и внеформального обучения.

В данной работе попытаемся осветить наиболее интересные, с этой точки зрения, результаты двух предметных проектов, связанных с разработкой и использованием региональной рамки квалификаций - Темпус «Разработка рамки квалификаций для системы высшего образования Уральского региона» [8] и РГНФ №12-06-00067 «Адаптивное управление качеством профессионального образования на основе компетентностного подхода (на примере сферы ИТ)». При этом необходимо отметить, что в рамках первого проекта исследование охватило все уровни профессионального образования, и, по сути, была получена рамка квалификаций для системы непрерывного образования Челябинской области (далее – региональная рамка квалификаций).

МЕТОДИКИ

В ходе первого проекта были изучены работы, посвященные описанию результатов обучения на разных уровнях системы непрерывного профессионального образования в России и за рубежом, определены принципы и методы построения региональной рамки квалификаций. Методологической основой разработки рамки квалификаций являлся компетентностный подход.

Пилотное исследование определило следующую существенную черту, характеризующую различие в понимании подходов в описании результатов обучения. В сфере образования использованный подход описания требований к результатам обучения близок методологии, принятой в европейской практике, ориентированной на компетенции. С учетом именно такого подхода разработаны федеральные государственные образовательные стандарты третьего поколения. В то же время работодатели при формировании требований к труду исходят не из принятых в педагогической методологии подходов, а из действующих квалификационных справочников и только набирающими силу

профессиональных стандартов, в которых компетенции и должностные обязанности синонимичны. В связи с этим было принято решение первоначальной независимой разработки двух документов: образовательной и профессиональной сеток квалификаций, а затем их интеграция в единую региональную рамку квалификаций. Это позволило выработать «общий язык» описания требований к результатам обучения, который понимается однозначно как представителями рынка труда, так и образовательным сообществом.

В целях обеспечения эффективности процесса разработки были определены следующие требования к разработке:

- в отношении дескрипторов:
 - краткость описания и понятность формулировок дескрипторов не только для системы образования, но и рынка труда;
 - максимальный перенос дескрипторов исходных сеток (профессиональной и образовательной) в единую рамку;
 - выделение по каждому дескриптору критериев, обеспечивающих дифференцируемость результатов обучения на разных уровнях;
- в отношении квалификационных уровней:
 - учет особенностей существующей национальной системы профессионального образования;
- в отношении результатов обучения:
 - понятность и однозначность понимания формулировок как с точки зрения представителей образовательной среды, так и работодателей;
 - преемственность результатов обучения исходных сеток (профессиональной и образовательной) [2,5].

В отношении к региональной рамке квалификаций в целом на этапе предпроектного исследования не было предъявлено требование согласованности с национальной рамкой квалификаций. Это обусловлено желанием разработчиков получить независимое целостное представление, включающее региональные особенности, в отношении требований к результатам обучения.

Разработка системы дескрипторов велась с опорой на результаты международного проекта TUNING, федеральные государственные образовательные стандарты и нормативные документы, устанавливающие требования к труду работников на федеральном (национальном), отраслевом и корпоративном уровне (уровне отдельных предприятий и организаций).

Социологический этап исследования охватил руководителей и представителей профессиональных образовательных учреждений разного уровня (149 профессиональных образовательных учреждений Челябинской области), а также предприятий различного типа (33 предприятия) относительно требований, как к результатам обучения (знаниям умениям и компетенциям выпускников, работников предприятий).

Дескрипторы в рамке квалификаций характеризуют результаты обучения через знания, умения и качества личности. Преемственность уровней определя-

ется приращением практического опыта работы, обучения и самообразования [1]. Это демонстрирует фрагмент рамки квалификаций по 4 и 6 уровням, соответствующим в контексте формального обучения освоения программ бакалавриата и магистратуры (табл. 1).

Как оказалось, полученная региональная рамка квалификаций является согласованной по уровням с национальной рамкой квалификаций, раскрывая требования к результатам обучения гораздо более подробно (см рисунок).



Соотнесение структуры Национальной рамки квалификаций и рамки квалификаций системы непрерывного образования Челябинской области

В рассматриваемом исследовании изначально была поставлена цель разработки рамки квалификаций, основанной на формальном обучении. Однако проведенное в Челябинской области интервьюирование, охватившее, с одной стороны, все образовательные учреждения, а с другой – большинство организаций разных типов, позволило учесть в рамке квалификаций переход от одного уровня к другому как с точки зрения формального, так и неформального и внеформального обучения. В соответствии с глоссарием рассматриваемого проекта Темпус, неформальное обучение – это обучение по программам дополнительного профессионального образования, а внеформальное обучение рассматривается как самостоятельное обучение или опыт работы (на рабочем месте) [5].

Передвижение от одного квалификационного уровня к другому в зависимости от вида обучения может осуществляться через освоение программ более высокого уровня профессионального образования, дополнительного профессионального образования, а также, что немаловажно для системы оценки достижения квалификационного уровня и признания квалификаций, путем самообразования или приобретения опыта на рабочем месте.

В табл. 2 представлены пути достижения квалификационных уровней посредством формального, неформального и внеформального обучения.

Таблица 1

Дескрипторы уровней рамки квалификаций непрерывного образования Челябинской области

Дескрипторы	4 уровень	6 уровень
Базовые знания в различных областях	Систематизированные факты, способствующие пониманию целостной научной картины мира	Знания о научной картине мира на уровне их использования для решения поставленной проблемы исследования
Профессиональные знания	Обобщенные теоретические и практические знания, а также знания нормативно-справочных и руководящих документов, управленческие знания, необходимые для понимания сущности организации и оперативного контроля собственной учебно-профессиональной деятельности и деятельности коллектива	Научные знания, знание нормативной и распорядительной документации, методических и нормативных материалов, управленческие знания, необходимые для оценки и оптимизации процессов, внедрения инноваций и управления работой подчиненных в непредсказуемых ситуациях профессиональной деятельности
Обобщенные умения	Набор умений, требуемых для постановки и решения сложных задач на основе самостоятельного поиска, отбора и оценки необходимой для этого информации	Набор умений, необходимых для решения сложных нестандартных творческих и организационно-управленческих задач на основе самостоятельного обобщения, анализа и синтеза информации
Автономность	Осознанно использует инструкции и нормативно-правовые документы, способен организовать свое рабочее место, принимает участие в работе команды	Организует свою деятельность и/или работу группы на научной основе для решения сложных нестандартных задач; самостоятельно выполняет научный поиск в области профессиональной деятельности под научным руководством, осуществляет оценку результата
Коммуникативность	Использует устную и письменную речь на государственном языке как средство делового общения и представления результатов учебно-профессиональной деятельности, имеет начальную подготовку к межкультурной коммуникации	Излагает четко и ясно свою точку зрения по проблеме исследования, принимает участие в публичных выступлениях, имеет базовую подготовку для межкультурной коммуникации в рамках профессиональной деятельности
Ответственность	Отвечает за свою деятельность, определенную нормативно-правовыми документами; умеет дать полный письменный отчет, включающий элементы анализа как по своей работе, так и по работе в группе	Несет ответственность, определенную нормативно-правовыми документами, за свою деятельность и деятельность группы; принимает решения в ситуациях высокого риска и сложности и несет за них личную ответственность; способен дать аналитический отчет
Адаптивность	Осуществляет профессиональную деятельность в условиях обновления ее содержания	Ориентируется в условиях изменения целей и содержания профессиональной и/или научной деятельности, а также в условиях неопределенности
Мотивированность, способность к развитию	Оценивает свою роль и вносит активный вклад в деятельность организации, выбирает перспективные направления личностного и профессионального развития с учетом собственного видения и потребностей, занимается самообразованием	Осознает свою роль в коллективе и достижении целей организации. Стремится к профессиональному признанию и творческой самореализации

Таблица 2

Основные пути достижения квалификационных уровней

Квалификационный уровень	Пути достижения квалификации соответствующего уровня
4	<u>Формальное обучение:</u> по программам высшего профессионального образования на основе освоения программы не ниже среднего (полного) общего образования <u>Неформальное обучение:</u> профессиональная переподготовка и повышение квалификации на базе не ниже среднего профессионального образования <u>Внеформальное обучение:</u> обучение на рабочем месте, корпоративное обучение на базе среднего профессионального образования
6	<u>Формальное обучение:</u> по программам высшего профессионального образования (магистратура) на основе освоения программы бакалавриата или специалитета <u>Внеформальное обучение:</u> корпоративное обучение на базе высшего профессионального образования; практический опыт практико-ориентированных исследований

Говоря о системе оценки результатов обучения личности в рамках формального, неформального и внеформального обучения, нельзя не затронуть тему диагностического инструментария.

В ходе выполнения проекта РГНФ №12-06-00067 «Адаптивное управление качеством профессионального образования на основе компетентностного подхода (на примере сферы ИТ)» на основе рассмотренной региональной рамки квалификаций представлена методика оценки достижения квалификационных уровней, выделенных в рассмотренном выше проекте Темпус.

При этом так как под компетенциями понимаются доказанные способности применения знаний, умений, а также личных, социальных и методологических качеств в образовательной или профессиональной среде для профессионального или персонального развития [3], авторами в дополнение к педагогическому инструментарию оценки сформированности результатов обучения (ситуационные задачи, кейсы и пр.) предложены психологические диагностические методики и техники (фрагмент на примере 4 и 6 уровней представлен в табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование ориентировано на использование как его результатов, так и опыта их получения в проектах, посвященных развитию системы квалификации Российской Федерации, в частности связанных с построением адекватной требованиям рынка труда и образовательного сообщества системы аттестации выпускников образовательных учреждений профессионального образования и сертификации работников предприятий. В дальнейшем это позволит совершенствовать систему непрерывного образования на основе гармонизированных требований работодателей и образовательного сообщества к результатам обучения на разных уровнях. Именно на базе единых требований к результатам обучения должна осуществляться подготовка высококвалифицированных и конкурентоспособных специалистов, способных быстро адаптироваться к любым общественно-экономическим преобразованиям посредством обеспечения включения их в систему непрерывного профессионального образования.

Таблица 3

Диагностическая система оценки компетенций (фрагмент)

№	Компетенции	Методика	Шкалы методики	Уровни квалификации	Значение критерия
1	Автономность	Тест-опросник уровня субъективного контроля (Е.Ф. Бажин, Е.А. Польшин, А.М. Эт-кинд)	Общая интернальность (Ио)	4 уровень	38-58
				6 уровень	80-132
2	Коммуникативность	Многоуровневый личностный опросник «Адаптивность»	Коммуникативный потенциал	4 уровень	14-18
				6 уровень	5-1
3	Ответственность	Тест-опросник «Исследование волевой саморегуляции» (А.В. Зверькова и Е.В. Эйдемана)	Шкала «Волевая саморегуляция» является суммой шкал «Настойчивость» и «Самообладание»	4 уровень	8-11
				6 уровень	19-24
4	Адаптивность	Многоуровневый личностный опросник «Адаптивность»	Шкала «Адаптивные способности» (АС) представляет сумму шкал «Нервно-психическая устойчивость», «Коммуникативный потенциал», «Моральная нормативность»	4 уровень	86-57
				6 уровень	28-18 и менее
5	Мотивированность, способность к развитию	Модифицированный тест-опросник измерения мотивации (А. Мехрабиана по адаптации М.Ш.Магомед-Эминов)	Шкалы: мотивация достижения; мотивация избегания неудач	4 уровень	121-164
				6 уровень	188-210

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курзаева Л.В., Овчинникова И.Г., Захарова Т.В. К вопросу о разработке рамки квалификаций и профессиональных стандартов в интегративных средах (на примере информатики и образования) // Гуманитарные и социальные науки. 2012. №4. URL: http://www.hses-online.ru/2012/04/13_00_08/24.pdf.
2. Курзаева Л.В., Овчинникова И.Г., Самарокова И.В. Методико-технологические аспекты создания рамки квалификаций для системы профессионального образования // Современные проблемы науки и образования. 2013. №3. URL: www.science-education.ru/109-9255.
3. Курзаева Л.В., Овчинникова И.Г., Слепухина Г.В. Психолого-педагогический инструментарий оценки и диагностики результатов обучения личности по направлениям подготовки в сфере ИТ. Магнитогорск: МаГУ, 2013. 40 с.
4. Национальная рамка квалификаций Российской Федерации: Рекомендации / О. Ф. Батрова [и др.]. М.: Федеральный институт развития образования, 2008. 14 с.

5. Овчинникова И.Г., Курчатова Б.В., Курзаева Л.В. Региональная рамка квалификаций: роль и место в системе непрерывного профессионального образования, опыт разработки: монография. Магнитогорск: МаГУ, 2010. 143 с.
6. Олейникова О.Н., Муравьева А.А. Система квалификаций в странах Европейского союза [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cvets.ru/NQF/NQF-EC.pdf>.
7. Олейникова О.Н., Муравьева А.А., Аксёнова Н.М. Обучение в течение всей жизни как инструмент реализации Лиссабонской стратегии. М.: РИО ТК им. Коняева, 2009. 131 с.
8. Темпус «Разработка рамки квалификаций для системы высшего образования Уральского региона»: официальный сайт проекта [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cquo.csu.ru/>.
9. Терминология профессионального обучения. Европейский глоссарий (русско-английский). CEDEFOP, 2004.

INFORMATION IN ENGLISH

ABOUT FORMATION THE RESULTS EVALUATION SYSTEM OF PERSON LEARNING WITHIN THE CONTEXT OF FORMAL, INFORMAL AND NON-FORMAL LEARNING

Kurzaeva L.V.

The paper presents the experience of developing a regional qualifications framework, which defines the requirements to the person learning results through an individual knowledge, skills and competences at a different qualification levels. The features of its development were reviewed, the degree of consistency with the National Qualifications Framework was discovered, the courses for achieving the qualification levels through formal, informal and non-formal learning were formulated. The pieces of a regional qualifications framework requirements to a learning results at the qualification levels, which are correspond to the levels of finished bachelor's and master's programs, and also the tools of psychological diagnostics their achievement in connection with the personal qualities were presented. The results of research may be interesting for a projects for developing a domestic qualification system, including issues, which are linked with the developing an adequate for a labor market and an educational community system of appraisal the graduates of educational institutions of professional education and certification of the employees.

Keywords: qualifications framework, competency-based approach, formal learning, informal learning, non-formal learning.

REFERENCES

1. Ovchinnikova I.G., Kurzaeva L.V., Zaharova T.V. K voprosu o razrabotke ramki kvalifikacij i professional'nyh standartov v integrativnyh sredah (na primere informatiki i obrazovaniya) [To the question of developing a qualifications framework and professional standards in the integrative environments (for example, in science and in education)]. *Gumanitarnye i social'nye nauki* [Humanities and Social Sciences], 2012, no.4. URL: http://www.hses-online.ru/2012/04/13_00_08/24.pdf.
2. Ovchinnikova I.G., Kurzaeva L.V., Samarokova I.V. Metodiko-tehnologicheskie aspekty sozdaniya ramki kvalifikacij dlja sistemy professional'nogo obrazovaniya [Methodology and technological aspects of qualifications framework for vocational

education]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 3. URL: www.science-education.ru/109-9255.

3. Kurzaeva L.V., Ovchinnikova I.G., Slepukhina G.V. *Psihologo-pedagogicheskij instrumentarij ocenki i diagnostiki rezul'tatov obuchenija lichnosti po napravlenijam podgotovki v sfere IT* [Psycho-educational instruments of assessment and diagnosis the results of personality learning in areas of preparation in IT]. *Magnitogorsk. MaGU*, 2013, 40 p.

4. Batrova O.F. *Nacional'naja ramka kvalifikacij Rossijskoj Federacii: Rekomendacii* [National Russian Federation Qualifications Framework: Recommendations]. Moscow. The Federal Institute of Education Development, 2008, 14 p.

5. Ovchinnikova I.G., Kurchatov B. V., Kurzaeva L.V. *Regional'naja ramka kvalifikacij: rol' i mesto v sisteme nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya, opyt razrabotki: monografija* [Regional qualifications framework: role and place in the system of continuing professional education, experience of development: monograph]. *Magnitogorsk. MaGU*, 2010, 143 p.

6. Olejnikova O.N., Murav'eva A.A. *Sistema kvalifikacij v stranah Evropejskogo sojuza* [Qualifications system in the European Union]. URL: <http://www.cvets.ru/NQF/NQF-EC.pdf>.

7. Olejnikova O.N., Murav'eva A.A., Aksjonova N.M. *Obuchenie v techenie vsej zhizni kak instrument realizacii Lissabonskoj strategii* [Education over a lifetime as an instrument of the implementation of the Lisbon strategy]. Moscow. RIO TK im. Konjaeva, 2009, 131 p.

8. Tempus «Razrabotka ramki kvalifikacij dlja sistemy vysshego obrazovaniya Ural'skogo regiona»: oficial'nyj sayt proekta [Tempus "Development of the Qualifications Framework for the higher education system of the Ural region": the official site of the project]. URL: <http://cquo.csu.ru/>.

9. Terminologija professional'nogo obuchenija. *Evropejskij glossarij (russko-anglijskij)* [Terminology of vocational training. European glossary (Russian-English)]. CEDEFOP, 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахметова Айгуль Ураловна – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Белый Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры АЭПИМ, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: huhicheta1@mail.ru.

Бондарева Альбина Робертовна – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: albinabond1974@mail.ru.

Брылина Олеся Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: teolge@mail.ru.

Бычков Михаил Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия. E-mail: BychkovMG@mpei.ru.

Гузей Ксения Евгеньевна – инженер ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Дудкин Максим Михайлович – канд. техн. наук, доцент, кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральского государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: dudkinmax@mail.ru.

Коробейников Станислав Михайлович – ведущий инженер ЗАО «КонсОМ СКС», Магнитогорск, Россия.

Косматов Александр Константинович – аспирант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Крюков Олег Викторович – канд. техн. наук, главный специалист ОАО «Гипрогазцентр», Россия.

Кузнецова Валентина Николаевна – старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия.

Курзаева Любовь Викторовна – канд. пед. наук, доцент кафедры прикладной информатики, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lkurzaeva@mail.ru.

Ларина Татьяна Петровна – старший преподаватель кафедры электротехники и электротехнических систем ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tp_larina@mail.ru.

Маклаков Александр Сергеевич – аспирант, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: maklakov.work@gmail.com.

Масленникова Ольга Евгеньевна – канд. пед. наук, доцент, доцент ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: maslennikovaolga@yandex.ru.

Назарова Ольга Борисовна – канд. пед. наук, доцент, доцент ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: onazarova_21@mail.ru.

Обухов Геннадий Федорович – ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Обухова Татьяна Геннадьевна – ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Одинцов Константин Эдуардович – канд. техн. наук,

доцтуп, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kosodin@mail.ru.

Панов Александр Николаевич – канд. техн. наук, начальник отдела АСУП, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Петров Дмитрий Станиславович – инженер группы РЗА ПС 500 кВ «Щёлоков» филиала ОАО «Сетевая компания» «Елабужские электрические сети», г. Елабуга, Республика Татарстан.

Петухова Ольга Игоревна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Полухина Екатерина Ильинична – аспирант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Радионосов Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: RadionovAA@rambler.ru.

Рахматуллин Раис Мухибович – ведущий инженер кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральского государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Тюгаев Антон Валерьевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Храмшин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник НИС кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: hvrmgn@gmail.com.

Цытович Леонид Игнатьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральского государственного университета» (НИУ), г. Челябинск, Россия. E-mail: tsi@susu.ac.ru.

Усманов Ренат Раисович – заместитель начальника ПС 500 кВ «Щёлоков» филиала ОАО «Сетевая компания» «Елабужские электрические сети», г. Елабуга, Республика Татарстан.

Чистяков Дмитрий Владимирович – канд. социол. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Шохина Галина Владимировна – старший преподаватель кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Шурыгина Галина Владимировна – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Ячиков Игорь Михайлович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: jachikov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmetova Aigul Uralovna – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Belyj Aleksey Vladimirovich – Ph.D.(Eng.), associate professor of the department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: huhicheta1@mail.ru.

Brilina Olesya Gennadiyevna – Ph.D.(Eng.), associate professor of Electric Drive and Industrial Plant Automation department, “South Ural State University” (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: teolge@mail.ru.

Bichkov Mikhail Grigorievich – D.Sc. (Eng.), Professor, National Research University “MPEI”, Moscow, Russia. E-mail: BychkovMG@mpei.ru.

Bondareva Alibina Robertovna – Assistant Professor. department of automated control systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: albinabond1974@mail.ru.

Chistjakov Dmitriy Vladimirovich – Ph.D. in Sociology, chief executive officer, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia.

Dudkin Maksim Mihailovich – Ph.D.(Eng.), associate professor of the electric drive and automation of Industrial Installations department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: dudkinmax@mail.ru.

Guzej Kseniya Evgenievna – engineer, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia.

Khramshin Timur Rifhatovich – D.Sc.(Eng.), associate professor, chief research SRC scientist of the department of electrical engineering and electrotechnical systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hvrmgn@gmail.com.

Korobejnikov Stanislav Mihajlovich – chief engineer, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia.

Kosmatov Aleksandr Konstantinovich – post-graduate student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Krjukov Oleg Viktorovich – Ph.D.(Eng.), Chief specialist OJSC “Giprogascenter”, Russia.

Kurzaeva Lyubov Viktorovna Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor of Applied Informatics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lkurzaeva@mail.ru.

Kuznetsova Valentina Nikolaevna – Senior Researcher, National Research University “MPEI”, Moscow, Russia.

Larina Tatiyana Petrovna – Assistant Professor, the department of electrical engineering and electrotechnical systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tp_larina@mail.ru.

Maklakov Alexander Sergeyevich – post-graduate student of the department of Mechatronics, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: maklakov.work@gmail.com

Maslennikova Olga Yevgenievna – Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: maslennikovaolga@yandex.ru.

Nazarova Olga Borisovna – Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: onazarova_21@mail.ru.

Obukhov TatiGennadyi Fedorovich - Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Obukhova Tatiana Gennadiyevna - Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Odintsov Konstantin Eduardovich – Ph.D.(Eng.), Head of Electrical engineering and electrotechnical systems department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kosodin@mail.ru.

Panov Alexander Nikolaevich – Ph.D.(Eng.), head of process automation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Parsunkin Boris Nikolaevich – D.Sc.(Eng.), Professor, department of automated control systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Petrov Dmitriy Stanislavovich – engineer of RPAE of electric power substation 500 kV Schelokov, the branch office of OJSC “Network company” “Elabuga Electric Networks”, Elabuga, Republic of Tatarstan.

Petukhova Olga Igorevna – Ph.D. (Eng.), associate professor of the department of electrical engineering and electrotechnical systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Polukhina Ekaterina Iliinichna – post-graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Radionov Andrej Alexandrovich – D.Sc.(Eng.), Professor, Vice Rector for Academic affairs of South Ural state university (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: RadionovAA@rambler.ru.

Rahmatulin Rais Muhibovich – the senior scientific employee of the Electric Drive and Industrial Plant Automation department, FSSFEI HPE “South Ural State University” (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Shokhina Galina Vladimirovna – senior lecturer of the department of electrical engineering and electrotechnical systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Shurygina Galina Vladimirovna – Ph.D. (Eng.), associate professor, Associate Professor of the department of electrical engineering and electrotechnical systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Tsitovich Leonid Ignatievich – D.Sc.(Eng.), professor, Head of the Electric Drive and Industrial Plant Automation department, FSSFEI HPE “South Ural State University” (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: tsli@susu.ac.ru.

Tugaev Anton Valerevich – post graduate student of the Electric Drive and Industrial Plant Automation department, FSSFEI HPE “South Ural State University” (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Usmanov Renat Raisovich – deputy chief of electric power substation 500 kV Schelokov, the branch office of OJSC “Network company” “Elabuga Electric Networks”, Elabuga, Republic of Tatarstan.

Yachikov Igor Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Computer Engineering and Software Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: jachikov@mail.ru.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «Электротехнические системы и комплексы».

Требования к оформлению работы. Рекомендуемый объем статьи – 6-10 стр. Страницы не нумеруются. Статьи предоставляются в электронном виде в формате редактора *Microsoft Word 2003* или *2007* на одном из рабочих языков журнала. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы предоставляются на электронном носителе в виде файла и распечаткой на стандартных листах бумаги формата A4. Число авторов одной статьи не должно превышать *пяти* человек.

При наборе статьи рекомендуются **следующие установки:**

- шрифт – *Times New Roman*, размер – 12 пт., междустрочный интервал – 1,5 строки, перенос слов – автоматический;

- при вставке формул использовать встроенный редактор формул *Microsoft Equation 3.0* со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация формул. Буквы греческого и русского алфавитов выполняются прямым шрифтом, буквы латинского алфавита – курсивом;

- рисунки и фотографии, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров, в форматах **.TIF*, **.JPG*, с разрешением не менее 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, *Grayscale* – для полутонов. Все надписи на рисунках должны быть выполнены шрифтом *Times New Roman*, размер 10 пт. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. Таблицы нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц СИ.

Статья должна содержать следующие элементы:

1.1. **УДК** (выравнивание – по левому краю). **Наименование статьи** (на русском и английском языках; не более 15 слов) должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. **Аффилиция.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (на русском языке и транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов. Число авторов одной работы не должно превышать *пяти человек*.

1.3. **Аннотация** (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени). Представляется на русском и английском языках.

1.4. **Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов. Представляются на русском и английском языках.

1.5. **Основная часть статьи.** По тексту статьи необходимо выделить разделы согласно модели IMRAD. **Введение (Introduction)**, в котором отражается характеристика объекта, описание и степень разработки проблемы на основе критического анализа литературы (рекомендуется использовать от 10 до 30 источников), формулируется цель исследования. **Теоретические, экспериментальные, технические и технологические методика (Methods)**, в которых приводится описание теоретических подходов, математических моделей, алгоритмов, применяемых методов, экспериментальных исследований и материалов, технических и технологических разработок, оборудования. В статье, основанной на теоретических исследованиях, приводятся математические выкладки, доказательство воспроизводимости результатов и проверка их адекватности. В статье, основанной на экспериментальных исследованиях, описываются материалы и методы, использованные для получения результатов. Приводится общая схема и описание экспериментов. В аналитических статьях должны быть выявлены, сопоставлены и проанализированы наиболее важные и перспективные направления развития отрасли науки, событий и явлений по рассматриваемой тематике. Результаты исследования и их обсуждение, которые должны содержать результаты в виде таблиц, диаграмм и схем с короткими резюмирующими комментариями, их сопоставление с данными, полученными другими авторами. **Заключение и обсуждение (Result and Discussion)** (не более 1/3 страницы) должно содержать оценку степени достижения цели исследования, вклад полученных результатов в область исследования, в том числе практическое применение результатов и рекомендации, перспективы развития рассматриваемой проблемы. **Список литературы (References)** (на русском и английском языках) должен содержать перечень источников, на которые указаны ссылки по тексту статьи. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. В списке литературы не допускается использование более 30% работ авторов статьи и рекомендуется использование не менее 30% работ, опубликованных в зарубежных изданиях. Образец оформления списка литературы на русском и английском языках можно запросить по электронной почте.

Представление материалов. Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: ecis.red@gmail.com основной текст статьи, рецензию или представление ведущего специалиста в предметной области (сканированный документ) и экспертное заключение о возможности опубликования работы. Публикация в журнале бесплатная. Для получения печатного экземпляра журнала в электронном письме требуется указать необходимое количество экземпляров. Реквизиты и порядок оплаты будут высланы Вам по электронной почте. Контактный тел.: 8(3519)298581, +7 919 406 69 97 (Панова Евгения Александровна).