



# ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 15(148)  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА 2009

ISSN 1990-8512

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Выпуск 11

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

**Редакционная коллегия серии:**

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

к.т.н., доцент **Б.Г. Булатов**

(*зам. отв. редактора*);

к.т.н., доцент **Л.Т. Волков**;

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

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

д.т.н., профессор **Л.И. Цытович**;

д.т.н., профессор **Ш.Н. Хусаинов**

Серия основана в 2001 году.

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

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

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Подписной индекс 29564 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Электроэнергетика

ХОХЛОВ Ю.И., ФЕДОРОВА М.Ю., БАХТИЕВ Ф.Ф., ЧУПИН С.А. Технические решения и дизайн современной компенсированной преобразовательной подстанции нефтегазодобывающего комплекса .....	4
ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., ГОРШКОВ К.Е. Токораспределение между тиристорами в преобразователе системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме .....	10
КОРЖОВ А.В. Экспериментальная оценка возможности контроля состояния изоляции силового кабеля по спектру электромагнитных помех в радиочастотном диапазоне ....	17
СЕРЁЖИН К.С., СУВОРОВ И.Ф., СИДОРОВ А.И. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ .....	23
АНДРЕЕВ А.Н., ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., ШАЙПОВ Р.А. Эксплуатационная надёжность вентильных систем возбуждения синхронных генераторов .....	27
КОРНИЛОВ Г.П., НИКОЛАЕВ А.А., ЯКИМОВ И.А. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счёт силового электрооборудования .....	32

### Теплоэнергетика

ПАНФЕРОВ С.В., ТЕЛЕГИН А.И. Оценка качества регулирования уровня жидкости в системах теплоснабжения.....	39
--	----

### Преобразовательная техника

ЦЫТОВИЧ Л.И., КАЧАЛОВ А.В., ДУДКИН М.М., РАХМАТУЛИН Р.М. Адаптивная система синхронизации трехфазного мостового реверсивного тиристорного преобразователя .....	45
---	----

### Электромеханика

АНДРЮШИН И.Ю., ШИЛЯЕВ П.В., ГОЛОВИН В.В. Экспериментальные исследования системы автоматической коррекции натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки .....	51
СЕЛИВАНОВ И.А., ПЕТУХОВА О.И., СУЗДАЛЕВ И.В. Синтез систем регулирования непрерывных станков с многовалковыми калибрами .....	60
ЛОХОВ С.П., КРАВЕЦ Д.Н., СИВКОВА А.П. Формирование сигналов заданий следящим преобразователям частоты в электроприводе .....	64
АНИКИН А.С. Внедрение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на шахтный самоходный вагон В15К .....	67

### Альтернативные источники энергии

ЕЛИСТРАТОВ С.Л. Оценка границ технико-экономической эффективности применения тепловых насосов .....	72
---	----

# CONTENTS

## Electric power engineering

KHOKHLOV Y.I., FYODOROVA M.Y., BAKHTIEV F.F., CHUPIN S.A. Technical decisions and design of modern compensated converting substation of oil and gas extraction complex .....	4
GOLDSTEIN M.E., GORSHKOV K.E. Current distribution between thyristors in rectifier of synchronous generator excitation system at external asymmetric short circuits in power system .....	10
KORZHOV A.V. Experimental estimate of possibility to control the power cable isolation condition by means of spectrum of electromagnetic interference in radio-frequency bandwidth .....	17
SEREZHIN K.S., SUVOROV I.F., SIDOROV A.I. The way of automatic control of zero wire parameters of 0,4 kV airlines .....	23
ANDREEV A.N., GOLDSTEIN M.E., SHAIPOV R.A. Serviceability of valve excitement systems of synchronous generator .....	27
KORNILOV G.P., NIKOLAEV A.A., YAKIMOV I.A. Methods to increase the effectiveness of the electric arc furnaces by means of power electrical equipments .....	32

## Heat-power engineering

PANFEROV S.V. , TELEGIN A.I. Quality estimation of the choice and adjustment of automatic regulator of level of the liquid .....	39
--	----

## Converting technics

TSITOVICH L.I., KACHALOV A.V., DUDKIN M.M., RAKHMATULIN R.M. The decision of the task of structural identification of mathematical model of heating installation .....	45
--	----

## Electromechanics

ANDRYUSHIN I.Y., SHILYAEV P.V., GOLOVIN V.V. Experimental research of the system of automatic correction of tension in stand gap of broad-strip mill of hot rolling .....	51
SELIVANOV I.A., PETUHOVA O.I., SUZDALEV I.V. Synthesis of control systems of continuous rolling mills with multiroled calibers .....	60
LOKHOV S.P., KRAVETS D.N., SIVKOVA A.P. Formation of signals of tasks with the tracking frequency converter in electric drive .....	64
ANIKIN A.S. Adaptation of frequency-controlled asynchronous drive on shaft self-propelled car V15K .....	67

## Alternative energy sources

ELISTRATOV S.L. The estimate of the limits of technical and economical efficiency of heat pump application .....	72
--	----

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.632

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ДИЗАЙН СОВРЕМЕННОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

*Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтеев, С.А. Чупин\**  
*г. Челябинск, ЮУрГУ,*  
*\*г. Челябинск, НТЦ «Приводная техника»*

## TECHNICAL DECISIONS AND DESIGN OF MODERN COMPENSATED CONVERTING SUBSTATION OF OIL AND GAS EXTRACTION COMPLEX

*Y.I. Khokhlov, M.Y. Fyodorova, F.F. Bakhtiev, S.A. Chupin\**  
*Chelyabinsk, SUSU,*  
*\*Chelyabinsk, «Drive technology»*

Приведено новое схемное решение компенсированной преобразовательной подстанции для электроснабжения буровых установок нефтегазодобывающего комплекса. В пакете MATLAB 7.5 разработана модель и осуществлено моделирование электромагнитных процессов в системе электроснабжения разночастотных потребителей переменного тока. Описаны основные дизайнерские решения, принятые при разработке подстанции.

*Ключевые слова:* разночастотные потребители, моделирование в MATLAB, компенсированная преобразовательная подстанция.

A new circuit decision of compensated converting substation for power supply of boring installations of an oil and gas extraction complex is shown. In the packet MATLAB 7.5 a model has been developed and simulation of electromagnetic processes in the power supply system of different frequency consumer of an alternating current has been carried out. Basic design decisions accepted while working out the substation are described.

*Keywords:* different frequency consumers, simulation in MATLAB, compensated converting substation.

Большое и все возрастающее влияние нефтегазодобывающего комплекса на экономику России общеизвестно. Эффективность работы самого комплекса во многом определяется техническими решениями, принятыми при построении систем электроснабжения (СЭС) буровых установок. Наиболее распространенные СЭС с приводом постоянного тока имеют ряд существенных недостатков, в числе которых а) значительное потребление реактивной мощности и б) повышенный уровень гармонического воздействия на все оборудование сети переменного тока. В результате – неудовлетворительное качество и дополнительные потери электрической энергии в СЭС. Существенным является и то, что указанные недостатки ограничивают возможную длину линий переменного тока, связывающих питающие подстанции с буровыми

установками. Это, в свою очередь, приводит к необходимости сооружения большого числа дорогостоящих питающих подстанций.

В соответствии с общей тенденцией широкого применения электрической энергии переменного тока не промышленной частоты во всех отраслях народного хозяйства (гибкие линии электропередач переменного тока, технологические установки различного назначения, частотно-управляемый электропривод и др.) СЭС нефтегазодобывающего комплекса начинают строить с использованием преобразователей частоты, питающих асинхронные двигатели главных (буровые насосы, лебедка, ротор) и вспомогательных механизмов буровых установок [1].

Такое решение позволяет снизить потребляемую реактивную мощность, повысить качество



электрической энергии в сети, упростить привод за счет использования простой асинхронной машины, улучшить динамику и качество поддержания технологических параметров буровой установки. Однако и в этом случае ряд характеристик СЭС требует дальнейшего совершенствования. Сюда, прежде всего, следует отнести необходимость практически полной компенсации реактивной мощности и доведения коэффициента искажения напряжения сети переменного тока СЭС до требования ГОСТ 13109-97, что позволяет дополнительно снизить потери электрической энергии, а также существенно увеличить возможную длину линий переменного тока от питающей подстанции до буровых установок.

Указанным требованиям отвечает предлагаемая компенсированная преобразовательная подстанция, принципиальная схема одного из вариантов которой представлена на рис. 1. Она содержит подключенный к питающей сети переменного тока 1 двенадцатифазный компенсированный диодный выпрямитель 2, состоящий из преобразовательного трансформатора 3, выпрямительных мостов 4 и 5 и компенсирующего устройства 6 [2], а также распределительное устройство 7 в виде шин постоянного тока 8 и коммутационной аппаратуры 9, с помощью которой к шинам постоянного тока 8 подключаются  $n$  автономных инверторов 10, питающих потребителей переменного тока (асинхронные двигатели) 11 с частотами напряжения  $f_1, f_2, \dots, f_n$ . В предлагаемой СЭС инверторы выполнены по схемам автономных инверторов напряжения с предвключенными блоками тормозных резисторов. Блок тормозного резистора представляет собой последовательно соединенную цепочку из электронного ключа и активного сопротивления, подключенную к входу автономного инвертора. В случае когда потребители переменного то-

ка 11 территориально удалены от выпрямителя 2, подключение распределительного устройства 7 к выпрямителю 2 выполняется посредством линии электропередачи постоянного тока.

Одним из наиболее эффективных способов нормализации гармонического воздействия устройств энергетической электроники на питающую сеть является переход на повышенную фазность преобразования. С этой целью в предлагаемой подстанции используется двенадцатифазный выпрямитель (при необходимости может использоваться преобразователь и большей фазности). Двенадцатифазные выпрямители строятся на основе двух шестифазных блоков, коммутационные процессы в вентилях которых сдвинуты на 30 эл. град. Гармоники 5 и 7, 17 и 19 входных токов блоков замыкаются внутри двенадцатифазных преобразователей и, создавая дополнительные потери электрической энергии, в обычных некомпенсированных выпрямителях не совершают полезной работы. Для активизации деятельности этих гармоник в выпрямитель 2 включается компенсирующее устройство 6. На конденсаторах этого устройства создаются напряжения соответствующих гармоник, осуществляющие опережающую искусственную коммутацию вентилях выпрямительных мостов 4 и 5. В результате компенсированная преобразовательная подстанция приобретает целый ряд отмеченных ниже положительных свойств. Электромагнитные процессы, связанные с работой компенсированного выпрямительного агрегата, отражены на рис. 2 (здесь и далее тонкими линиями показаны диаграммы напряжений, а жирными – тока; приводимые ниже результаты исследований получены путем моделирования СЭС в пакете MATLAB 7.5).

Автономными инверторами напряжения 10, питаемыми от шин постоянного тока 8 распреде-

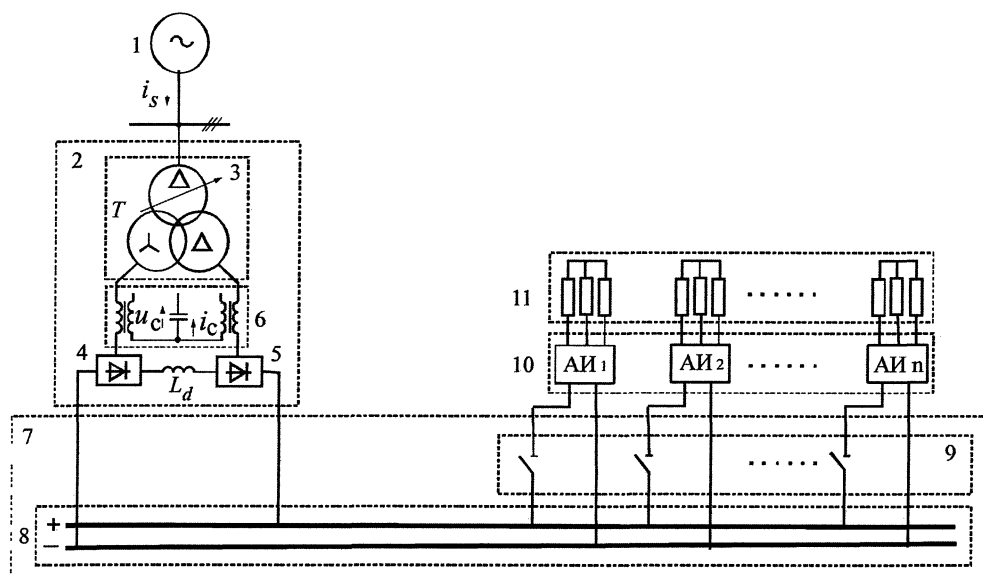


Рис. 1. Принципиальная схема компенсированной преобразовательной подстанции

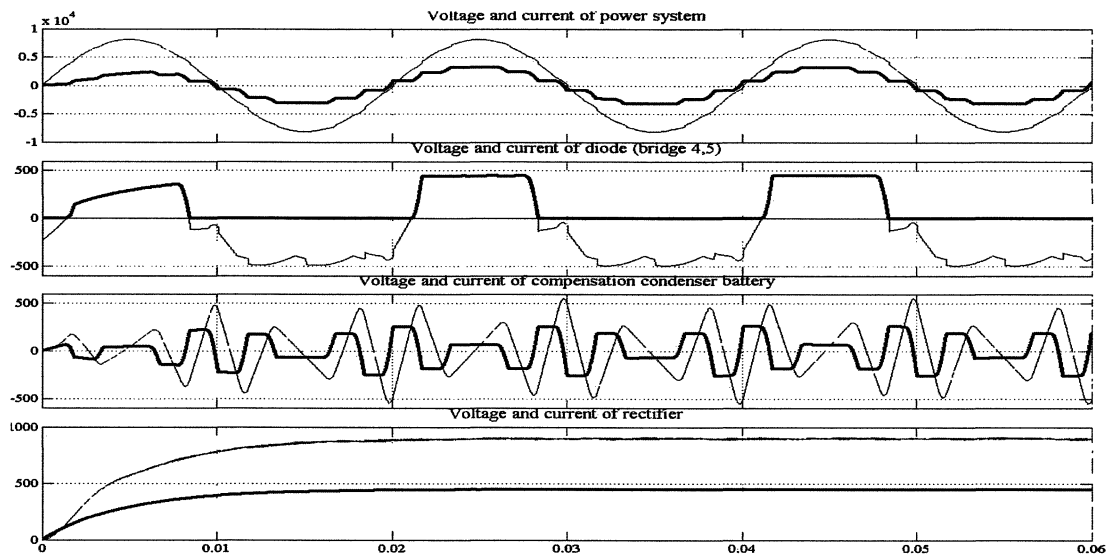


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений и токов в компенсированном выпрямителе

лительного устройства 7, создаются переменные напряжения необходимой регулируемой частоты на потребителях 11 с применением синусоидальной широтно-импульсной модуляции (см. рис. 1). Для примера на рис. 3 приведены временные диаграммы напряжений и токов для двух потребителей, работающих на частотах 100 и 50 Гц.

Покажем основные преимущества предлагаемой компенсированной преобразовательной подстанции в условиях работы нефтегазодобывающего комплекса. Прежде всего, оценим ее воздействие на питающую сеть переменного тока. Как видно из диаграмм напряжения и тока на рис. 2, первые гармоники напряжения и тока сети совпадают по фазе, что говорит о полной компенсации реактивной мощности в питающей сети. Причем вследствие использования принципа последовательной компенсации, имеет место саморегулирование реактивной мощности, генерируемой устройством. Результатом этого является снижение

потерь электрической энергии в сети и повышение жесткости внешней характеристики выпрямителя, т.е. поддержание выпрямленного напряжения на шинах 8 при изменениях потребляемого нагрузками 11 тока. Последнее, с одной стороны, обеспечивает указанное выше увеличение возможной длины линий переменного тока от питающей подстанции до преобразовательной подстанции буровой установки, а, с другой, улучшает работу автономных инверторов и питаемых ими потребителей.

Кривые сетевых напряжения и тока имеют форму, классическую для двенадцатифазного режима преобразования (см. рис. 2). Об этом же свидетельствуют результаты спектрального анализа сетевого напряжения, представленные на рис. 4. В напряжении и токе питающей сети исключаются 5 и 7, 17 и 19 и остальные гармоники с шагом 12, что существенно снижает гармоническое воздействие на сеть и повышает качество напряжения в СЭС.

Из рис. 2 и 5 следует, что неиспользуемые

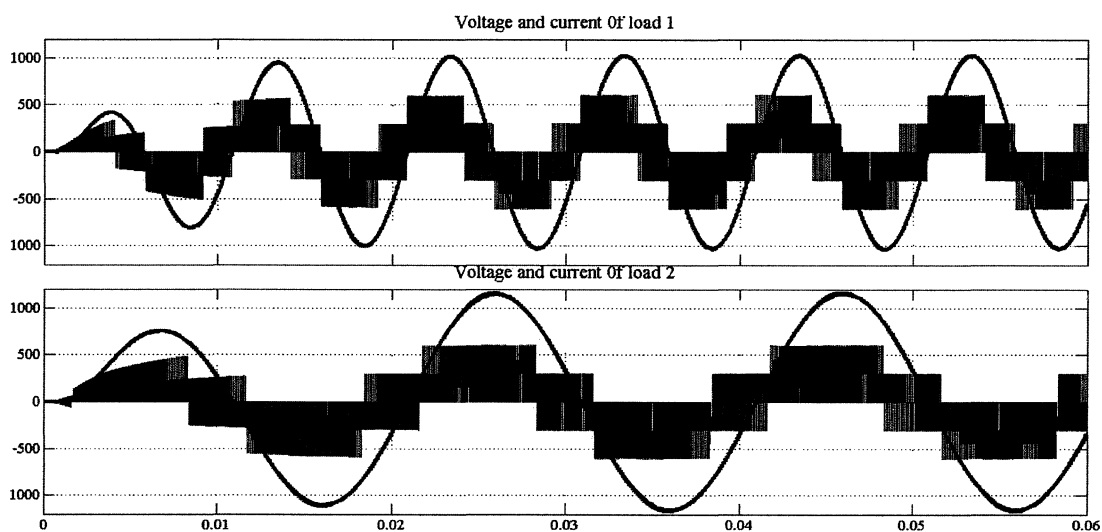


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов потребителей переменного тока с частотами 100 и 50 Гц

в некомпенсированных преобразователях 5 и 7, 17 и 19 гармоники шестифазных блоков теперь нагружают конденсаторы компенсирующего устройства 6, т.е. совершают полезную работу, обеспечивая указанную выше полную компенсацию реактивной мощности в сети. Причем при работе компенсирующего устройства преимущественно на частотах 250 и 350 Гц оно имеет минимальную установленную мощность. Здесь наблюдается аналогичный эффект, который имеется в механическом редукторе – проигрывая в скорости, выигрываем в моменте. В нашем случае компенсирующее устройство работает на частотах 250 и 350 Гц, а компенсация реактивной мощности осуществляется в питающей сети, т.е. на частоте 50 Гц. Проигрывая на таком переходе по частоте, выигрываем по установленной мощности компенсирующего устройства.

Переменные напряжения потребителей 11 формируются использованием в автономных инверторах 10 синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Эти потребители получают возмож-

ность полноценного питания с различной регулируемой частотой напряжения. Об этом говорят временные диаграммы на рис. 3 и 6–9. Спектральные составы напряжения и тока потребителей 11 определяются первой гармоникой и массивами высокочастотных гармоник, сконцентрированных возле частот, кратных несущей частоте. На приведенных диаграммах несущая частота равна 10 000 Гц. Как видно из рис. 6–9, в кривых напряжения, имеющих ярко выраженный импульсный характер, коэффициент искажения синусоидальности существенно выше, чем в кривой тока. Индуктивная нагрузка, такая как асинхронный двигатель, является хорошим фильтром для высокочастотных гармоник. При создании СЭС данный эффект может быть использован. Однако при этом асинхронные машины должны иметь специальное исполнение. Использование обычных двигателей, рассчитанных на синусоидальный режим работы, возможно с применением предвключенных низкочастотных фильтров.

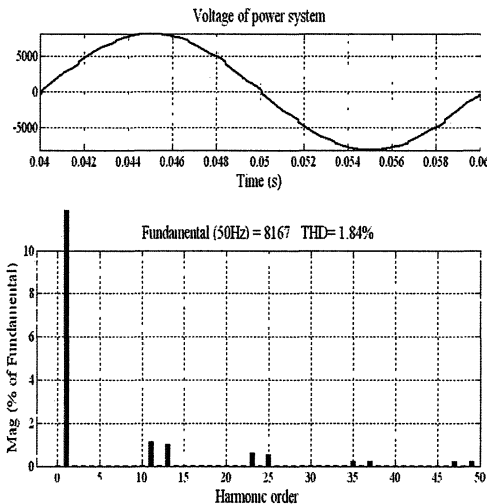


Рис. 4. Спектр напряжения питающей сети

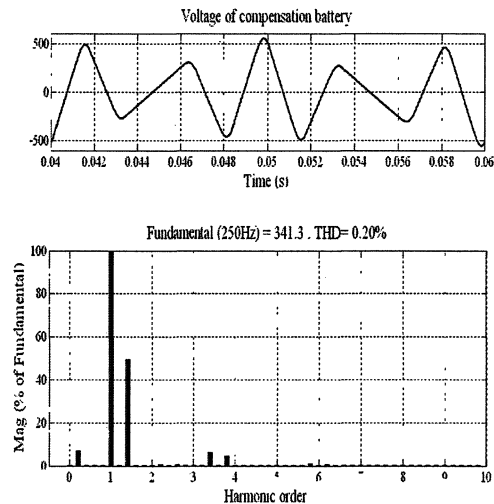


Рис. 5. Спектр напряжения на конденсаторной батарее

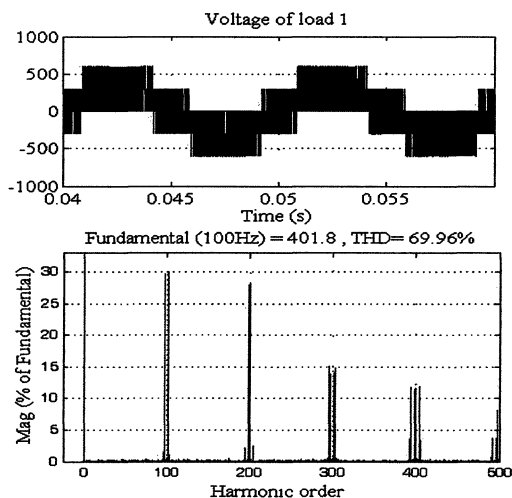


Рис. 6. Спектр напряжения на потребителе с частотой 100 Гц

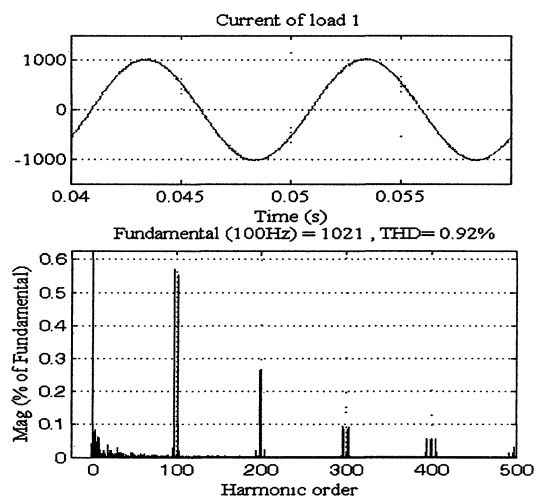


Рис. 7. Спектр тока потребителя с частотой 100 Гц

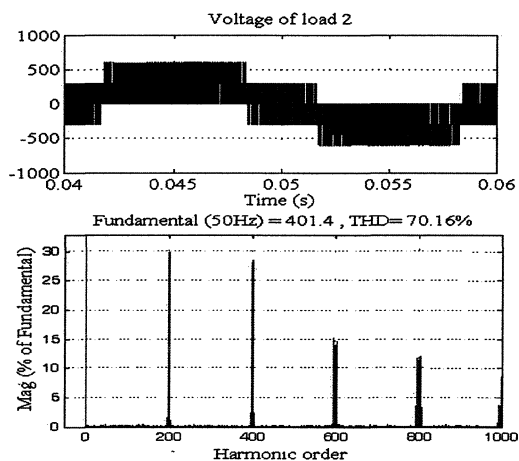


Рис. 8. Спектр напряжения на потребителе с частотой 50 Гц

К объектам электроэнергетики предъявляются высокие требования по дизайну. Некоторое представление о дизайне рассматриваемых преобразовательных подстанций дают фотографии (рис. 10–12). Дизайнерские решения подчинены возможности транспортировки подстанций автомобильным, морским и железнодорожным транспортом, минимальным срокам и затратам при введении оборудования в

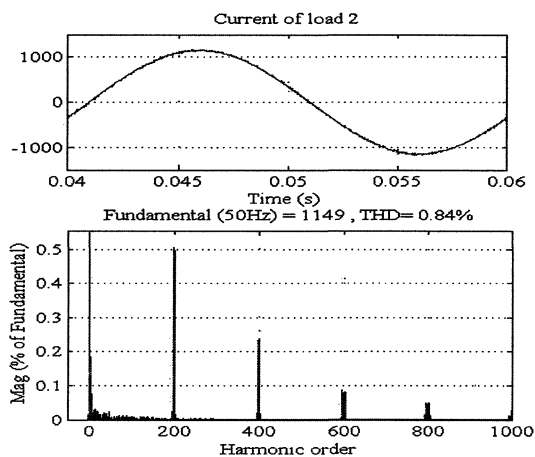


Рис. 9. Спектр тока потребителя с частотой 50 Гц

эксплуатацию, надежности и удобству управления буровыми установками, а также высокой ремонтно-пригодности. Поэтому преобразовательные подстанции разрабатываются в виде законченных программно-технических комплексов в блочно-модульном исполнении. Электрооборудование подстанции размещается в специальном контейнере (рис. 10). Контейнер изготавливается в климатическом исполне-

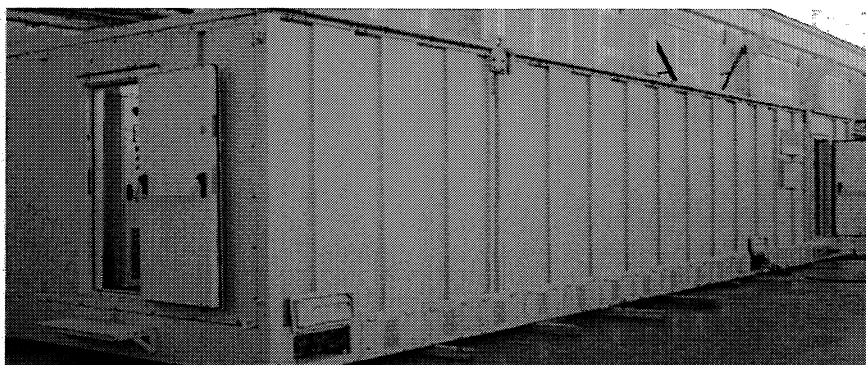


Рис. 10. Общий вид контейнера

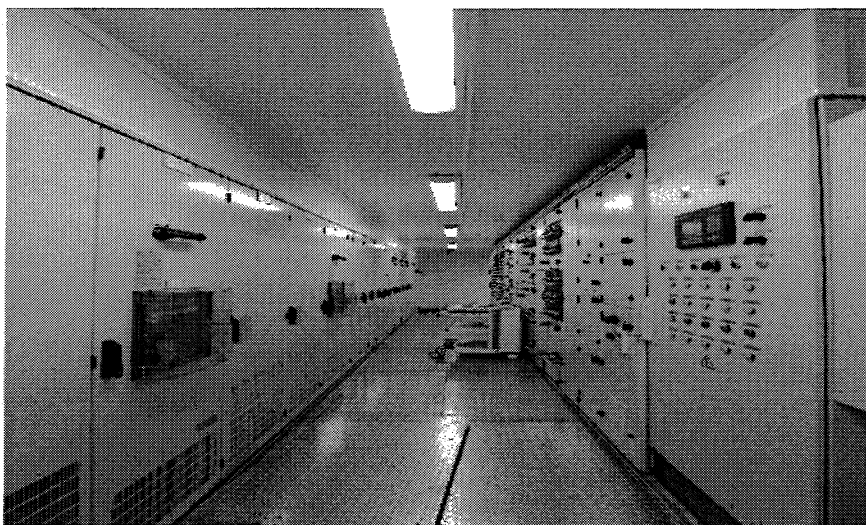


Рис. 11. Дизайн внутреннего пространства контейнера

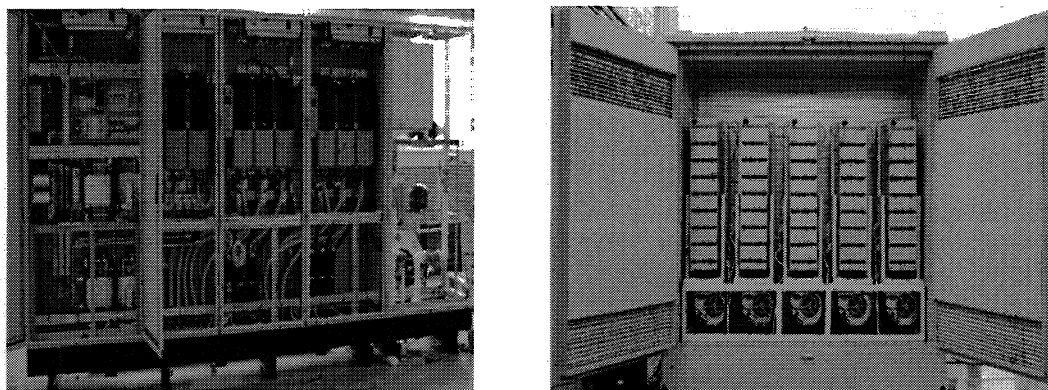


Рис. 12. Дизайн компоновки основного оборудования

нии УХЛ1 по ГОСТ 15150-69. Он оснащен системой регулирования температуры. Температура внутри контейнера поддерживается в диапазоне от +10 до +40 °С при изменении внешней температуры от –50 до +45 °С. Контейнер комплектуется системами: освещения, обогрева, кондиционирования, связи и пожарной сигнализации. Габаритные размеры коридора обслуживания в контейнере и современный дизайн (рис. 11) полностью отвечают нормативным требованиям.

#### Литература

1. Чупин, С.А. *Современные системы управления механизмами буровых установок российского производства* / С.А. Чупин // *Энергетика тюменского региона*. – 2008. – № 1. – С. 61–64.
2. Хохлов, Ю.И. *Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутационные конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков* / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧТУ, 1995. – 355 с.

Поступила в редакцию 04.02.2009 г.

**Хохлов Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, декан энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения». Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-51.

**Khohlov Yury Ivanovich** – doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the Academy of Electrotechnical Science of the Russian Federation, Dean of the Power Engineering Faculty of South Ural State University, Head of the Power Supply Systems department, expert in the field of electrical engineering theory, power electronics and power saving systems. Contact phone: 8-(351) 267-92-51.

**Федорова Мария Юрьевна** – старший преподаватель кафедры «Дизайн» ЮУрГУ. Специалист в области промышленного дизайна. Контактный телефон: 8-912 777 7169.

**Fyodorova Maria Yuryevna** – senior lecturer of the Design department of South Ural State University, expert in the field of industrial design. Contact phone: 8-912 777 7169.

**Бахтиев Фидан Фиргатович** – аспирант кафедры «Системы электроснабжения». Специалист в области силовой электроники. Контактный телефон: 8-906 865 7249.

**Bakhtiev Fidan Firgatovich** – post-graduate student of the Power Supply Systems department of South Ural State University. The field of scientific activity is power electronics. Contact phone: 8-906 865 7249.

**Чупин Сергей Анатольевич** – генеральный директор НТЦ «Приводная техника». Специалист в области автоматизированного электропривода. Контактный телефон: 8-912 308 0248.

**Chupin Sergey Anatolyevich** – general director of the research and development centre «Drive technology». Specialist in the field of automated electrical drive. Contact phone: 8-912 308 0248.

# ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУ ТИРИСТОРАМИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ СИСТЕМЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВНЕШНИХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## CURRENT DISTRIBUTION BETWEEN THYRISTORS IN RECTIFIER OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION SYSTEM AT EXTERNAL ASYMMETRIC SHORT CIRCUITS IN POWER SYSTEM

M.E. Goldstein, K.E. Gorshkov  
Chelyabinsk, SUSU

Анализ электромагнитных процессов в режиме форсировки синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме показал неравномерное распределение токов тиристорov. Рассмотрены условия выравнивания интервалов проводимости тиристорov при разных способах синхронного фазового управления тиристорным преобразователем.

**Ключевые слова:** короткое замыкание, КЗ, система возбуждения генератора, система управления тиристорами, многоканальная СУТ, одноканальная СУТ, синхронизация.

The analysis of electromagnetic processes in the mode of forcing of synchronous generator at external asymmetric short circuits in power system showed the non-uniform distribution of thyristors current. The conditions of leveling the intervals of conductivity of thyristors at different ways of synchronous phase control over thyristor rectifier are considered.

**Keywords:** short circuit, generator excitation system, thyristor control system, multi-channel rectifier control system, single-channel rectifier control system, synchronization.

Сегодня широкое применение нашли синхронные генераторы (СГ) с системами тиристорного самовозбуждения (СТС). В такой системе величины напряжения и тока ротора зависят от напряжений на выводах статорной обмотки генератора. При внешних КЗ в энергосистеме напряжение на выводах СГ снижается, что приводит к ухудшению условий работы системы самовозбуждения (ССВ). В работах [1, 2] показано влияние вида и удаленности КЗ на коэффициент форсировки по напряжению на начальном этапе форсировки, а также на распределение длительностей работы тиристорov в установившемся режиме.

Неравномерность длительностей работы тиристорov вызвана несимметрией напряжений сети, питающей тиристорный преобразователь (ТП). В зависимости от вида несимметричного КЗ и группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения (ТСВ) тиристоры в некоторых плечах преобразователя могут работать с интервалами проводимости (ИПТ), превышающими 120 эл. град на 14–34 % [3].

На рис. 1 представлена зависимость температуры нагрева тиристорov от величины ИПТ при внешнем несимметричном КЗ для генератора ТГВ-200-2М (тиристоры Т353-800-32 с водяным

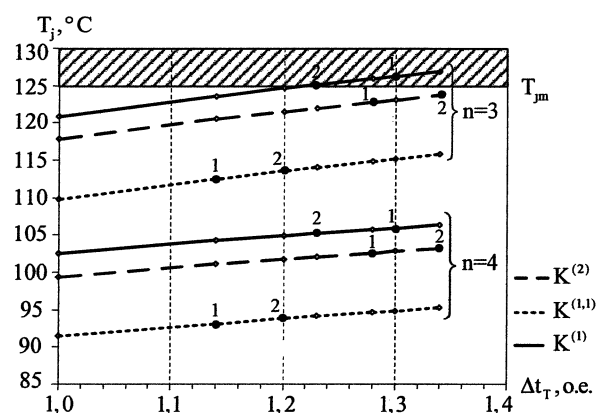


Рис. 1. Зависимость предельной температуры тиристора преобразователя ССВ ТГВ-200-2М от величины ИПТ в режиме форсировки при КЗ

охлаждением,  $T_{охл} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_\Phi = 20 \text{ с}$ ). Кривые соответствуют плечу с наиболее нагруженными тиристорами. Рассматривались варианты с штатным числом параллельных тиристоров в плече ТП ( $n = 4$ ) и при выходе из строя одной из ветвей ( $n = 3$ ). Точки 1 и 2 соответствуют КЗ на вводах обмотки ВН блочного трансформатора для схем соединения обмоток ТСВ Y/Y и Y/D (D/Y) соответственно.

Из графиков видно, что небаланс токов, вызванный несимметрией питающих напряжений, может оказывать влияние на работу СТС в предельных режимах. Проблема возможной перегрузки тиристоров не затрагивает начальный этап форсировки, когда током возбуждения еще не достигнуто двойное номинальное значение. В установившемся режиме форсировки перегрузка тиристоров может привести к необходимости снижения тока возбуждения и, следовательно, сокращению времени форсировки.

В качестве одного из подходов решения данной проблемы предлагается совместное применение разных способов управления тиристорами, обеспечивающих наибольшее напряжение на обмотке возбуждения на начальном этапе форсировки и выравнивание ИПТ в установившемся режиме. Реализация такого подхода стала возможна с появлением микропроцессорных систем управления тиристорами (МПС СУТ).

Для управления ТП ССВ используются одноканальные или многоканальные системы синхронного фазового управления (ОСУТ, МСУТ). Особенностью синхронной СУТ является отсчет подачи импульсов управления от определенной точки напряжения питающей сети [4]. В связи с этим от выбора напряжения синхронизации зависит величина выпрямленного напряжения, а также равномерность распределения ИПТ. Добиться выравнивания ИПТ можно и при несимметричном управлении преобразователем за счет пофазной коррективки углов управления тиристорами. Ниже рассмотрены условия выравнивания ИПТ при симметричном и несимметричном синхронном управлении тиристорами в зависимости от вида и удаленности КЗ.

**Расчет величин и фаз питающих напряжений ТП ССВ при разных группах соединения обмоток ТСВ.** В работе [1] анализ питающих напряжений выполнен для трансформатора ССВ со схемой соединения обмоток Y/Y-12. В ССВ отечественных и зарубежных производителей применяются трансформаторы с разными группами соединения обмоток. Поэтому выполним анализ напряжений на выводах обмотки НН ТСВ в обобщенной форме для произвольной группы соединения обмоток.

На рис. 2 изображена эквивалентная схема замещения прямой последовательности СГ для начального момента времени при разных видах КЗ ( $n$ ). Схема и группа соединения обмоток ТСВ

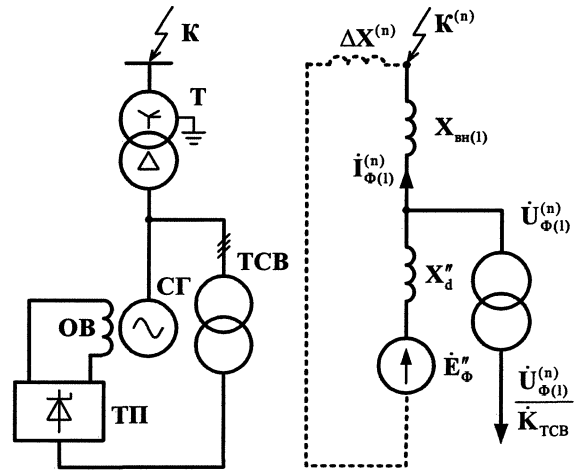


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения прямой последовательности синхронного генератора с СТС при внешнем несимметричном КЗ

учтены в виде комплексного коэффициента трансформации  $\dot{K}_{ТСВ} = K_{ТСВ} \cdot e^{\pm jN \cdot \frac{\pi}{6}}$ , где  $N$  – группа соединения обмоток 1, 2, ..., 12(0).

Величины и углы фазных напряжений на вводах ТП при внешнем двухфазном КЗ между фазами А и В и однофазном КЗ фазы С можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} |\dot{U}_\Phi| = \frac{|\dot{E}_\Phi'|}{K_{ТСВ}} \times \\ \times \frac{\sqrt{(x_{ВН}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2)^2 + 4 \cdot x_{ВН}^{(n)} \cdot k^{(n)} \cdot x_2 \cdot \sin^2(\alpha_\Phi)}}{x_d' + x_{ВН}^{(n)}}, \quad (1) \\ \varphi_\Phi = \beta_\Phi - \arctg\left(\frac{x_{ВН}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2}{x_{ВН}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \tg(\alpha_\Phi)\right) + \psi, \end{cases}$$

$$\text{где } k^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)}, \\ -\frac{x_{ВН}^{(n)} - x_{ВН(1)}}{x_2 + x_{ВН(1)}}, & \text{для } K^{(1,1)}, \\ +1, & \text{для } K^{(1)}. \end{cases}$$

$$\alpha_\Phi = \begin{cases} (\pm N - 9) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_A, \\ (\pm N - 5) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_B, \\ (\pm N - 1) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_C. \end{cases}$$

$$\beta_\Phi = \begin{cases} 0, & \text{при } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_\Phi \leq \frac{\pi}{2}, \\ \pi, & \text{при } \frac{\pi}{2} < \alpha_\Phi < \frac{3\pi}{2}. \end{cases}$$



Здесь синхронный генератор описан сверхпереходными ЭДС  $\dot{E}_\Phi^n = |\dot{E}^n| \cdot e^{j\psi}$  и сопротивлением  $x_d^n$ , а также сопротивлением обратной последовательности  $x_2$ . Сумма эквивалентного сопротивления прямой последовательности внешней цепи  $x_{вн(1)}$  и добавочного сопротивления в точке КЗ  $\Delta x^{(n)}$  обозначена как  $x_{вн}^{(n)}$ . Углы  $\alpha_\Phi$  и  $\beta_\Phi$  – величины, учитывающие группу соединения обмоток ТСВ, в выражениях запись +N соответствует схемам обмоток Y/Y, D/D и Y/D, а запись –N соответствует D/Y. Так как обмотки блочного трансформатора со стороны генератора соединены в треугольник, то формулы справедливы для ТСВ с заземленной и изолированной нейтралью.

На рис. 3 приведены диаграммы питающих напряжений ТП (в долях от фазного номинального напряжения обмотки НН ТСВ) для генератора ТГВ-200-2М при разных видах КЗ за блочным трансформатором ТДЦ-250000/110/15,75. Каждая диаграмма включает в себя двенадцать векторов, соответствующих четырем независимым группам соединения обмоток. Следует отметить, что систему из двенадцати векторов при близком КЗ нельзя описать единой эллиптической кривой. В результате величина выпрямленного напряжения на обмотке возбуждения СГ различается для схем соединения обмоток ТСВ Y/Y (D/D) и Y/D (D/Y) на 1–3 %, а предельная длительность работы тиристоров на 4–6 % в зависимости от вида КЗ [3].

В установившемся режиме форсировки сопротивление статорных обмоток СГ увеличивается до  $x_d$ , а ЭДС соответствует двойному номиналь-

ному значению тока возбуждения, углы фазных напряжений ТСВ при этом не меняются.

**Выравнивание ИПТ при симметричном синхронном управлении тиристорами.** Различают СУТ с синхронизацией по линейным и фазным напряжениям питающей сети. В МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям при угле управления  $\alpha_y = 0$  моменты подачи управляющих импульсов совпадают с моментами естественного включения тиристоров. Для МСУТ с синхронизацией по фазным напряжениям и ОСУТ наблюдаются углы запаздывания включения тиристоров  $\epsilon$  [2]. Появление углов запаздывания приводит к перераспределению длительностей работы ключей.

Формулы для расчета значений  $\epsilon$  сведены в табл. 1. Интервалы запаздывания выражены через углы  $A(\alpha_\Phi)$  и  $B(\alpha_\Phi)$ , характеризующие несимметрию питающих напряжений ТП (рис. 4):

$$A(\alpha_\Phi) = \arctg \left| \left( \frac{x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2}{x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_\Phi - \frac{\pi}{3}) \right)^{\pm 1} \right|, \quad (2)$$

$$B(\alpha_\Phi) = \arctg \left| \left( \frac{x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2}{x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_\Phi \pm \frac{2\pi}{3}) \right)^{\pm 1} \right|. \quad (3)$$

Угол  $\alpha_\Phi$  зависит от группы соединения обмоток и рассчитывается согласно табл. 2 по формулам из выражения (1). Для ТСВ со схемами соединения обмоток Y/D и D/Y выражения (2) и (3) необходимо использовать с отрицательным знаком, в остальных случаях – с положительным.

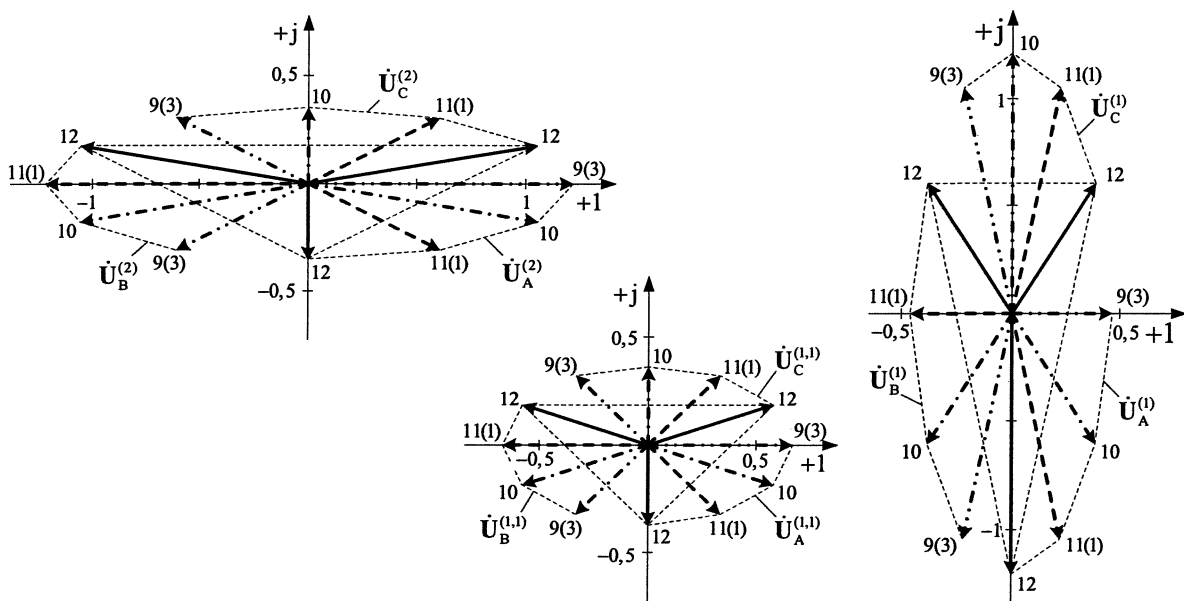


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений на вводах ТП ССВ ТГВ-200-2М при двухфазном (2), двухфазном на землю (1,1) и однофазном (1) КЗ за блочным трансформатором (группы соединения, указанные в скобках соответствуют ТСВ D/Y)



Таблица 1

Уравнения углов запаздывания включения тиристоров для разных групп соединения обмоток ТСВ при внешнем несимметричном КЗ

Угол, рад	Схема и группа ТСВ				Способ управления							
	Y/Y, D/D	6, 12	2, 8	4, 10	МСУТ		ОСУТ					
	Y/D	3, 9	5, 11	1, 7	U <sub>Ф</sub>	U <sub>Л</sub>	U <sub>A(B,C)</sub>	U <sub>B(C,A)</sub>	U <sub>C(A,B)</sub>	U <sub>AB(BC,CA)</sub>	U <sub>BC(CA,AB)</sub>	U <sub>CA(AB,BC)</sub>
	D/Y	9, 3	7, 1	11, 5			U <sub>A(B,C)</sub>	U <sub>B(C,A)</sub>	U <sub>C(A,B)</sub>	U <sub>AB(BC,CA)</sub>	U <sub>BC(CA,AB)</sub>	U <sub>CA(AB,BC)</sub>
ε	ε <sub>1</sub>	ε <sub>1,4</sub>	ε <sub>3,6</sub>	ε <sub>2,5</sub>	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$\frac{\pi}{6} - A$	B - A	$\frac{\pi}{3} - A - B$	$\frac{\pi}{3} - 2A$	$\frac{\pi}{6} - A$	0
	ε <sub>1-1</sub>	ε <sub>2,5</sub>	ε <sub>1,4</sub>	ε <sub>3,6</sub>	$\frac{\pi}{6} - B$		0	$B - \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - B$	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$A - \frac{\pi}{6}$
	ε <sub>1+1</sub>	ε <sub>3,6</sub>	ε <sub>2,5</sub>	ε <sub>1,4</sub>	$A + B - \frac{\pi}{3}$		$A - \frac{\pi}{6}$	$A + B - \frac{\pi}{3}$	A - B	0	$A - \frac{\pi}{6}$	$2A - \frac{\pi}{3}$

Примечание. Индекс напряжений синхронизации зависит от номера столбца, в который занесена рассматриваемая группа соединения обмоток ТСВ.

Таблица 2

Значения углов для разных ТСВ

Угол	Схема и группа ТСВ			
	Y/Y, D/D	6, 12	2, 8	4, 10
	Y/D	3, 9	5, 11	1, 7
	D/Y	9, 3	7, 1	11, 5
α <sub>Ф</sub>	α <sub>1</sub>	α <sub>A</sub>	α <sub>B</sub>	α <sub>C</sub>

Интервалы проводимости тиристоров без учета длительностей коммутаций:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \pi - 2A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i, \\ \Delta t_{i-1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}, \\ \Delta t_{i+1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i+1}. \end{cases} \quad (4)$$

В выражении (4) порядок чередования индексов углов запаздывания и ИПТ в зависимости от группы соединения обмоток ТСВ аналогичен табл. 1.

Запишем условие равенства ИПТ:

$$\Delta t_1 = \Delta t_{i-1} = \Delta t_{i+1} = \frac{2\pi}{3}, \text{ откуда}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i = 2A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{3}, \\ \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = \varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i+1} = \frac{\pi}{6} + A(\alpha_\Phi). \end{cases} \quad (5)$$

Согласно формулам табл. 1 данное условие справедливо для ОСУТ с синхронизацией по фазным и линейным напряжениям. Но в действительности не все указанные способы обеспечивают выравнивание ИПТ во всем диапазоне угла управления, так как некоторые углы ε могут быть отрицательными, т.е. являться углами преждевременной подачи управляющих импульсов [2]. В этом случае тиристоры будут включаться только

при появлении на них положительной разности напряжений.

Определим условия, при которых углы запаздывания могут принимать отрицательные значения. При симметрии питающих напряжений, например при трехфазном КЗ, углы A(α<sub>Ф</sub>) и B(α<sub>Ф</sub>)

равны друг другу и величине  $\frac{\pi}{6}$ . В случае несим-

метричного КЗ значения углов изменяются в зависимости от вида КЗ, его удаленности и схемы соединения обмоток ТСВ. Из сравнения диаграмм рис. 3 и кривых рис. 4 видно, что при двухфазном и двухфазном на землю КЗ справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{6} - A(\alpha_\Phi) < 0 \\ B(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{6} < 0 \end{cases} \text{ для Y/Y и D/D,} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{6} < 0 \\ \frac{\pi}{6} - B(\alpha_\Phi) < 0 \end{cases} \text{ для Y/D и D/Y.} \quad (7)$$

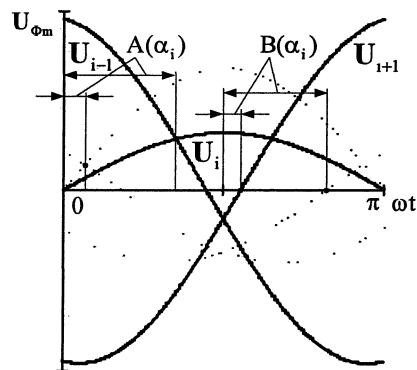


Рис. 4. Кривые питающих напряжений ТП в несимметричных режимах

При однофазном КЗ условия в (6) и (7) необходимо поменять местами. Для выявления способов синхронизации, обеспечивающих выравнивание ИПТ независимо от величины угла управления тиристорами, достаточно учесть приведенные ограничения. Результат представлен в табл. 3.

**Таблица 3**  
Напряжения синхронизации ОСУТ, обеспечивающие выравнивание ИПТ

Вид КЗ	Схема ТСВ	
	Y/Y, D/D	Y/D, D/Y
$K^{(2)}, K^{(1,1)}$	$U_{CA} (AB, BC)$	$U_{AB} (BC, CA), U_B (C, A)$
$K^{(1)}$	$U_{AB} (BC, CA), U_B (C, A)$	$U_{CA} (AB, BC)$

Примечание. Индексация аналогична табл. 1.

Для исследования ОСУТ с синхронизацией по напряжениям  $U_{B(C,A)}$  и  $U_{C(A,B)}$  выражений (6), (7) недостаточно, но условия выполнения соот-

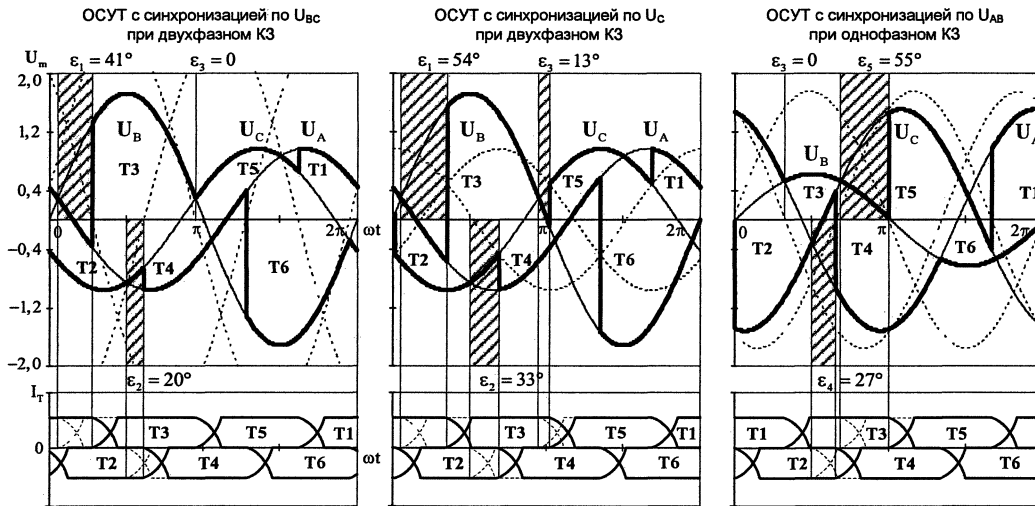
ношений  $\epsilon_{i+1} \geq 0$  и  $\epsilon_i \geq 0$  можно свести к записи:

$$\left( |x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2| - |x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2| \right)^2 \geq 0, \text{ для } U_{B(C,A)},$$

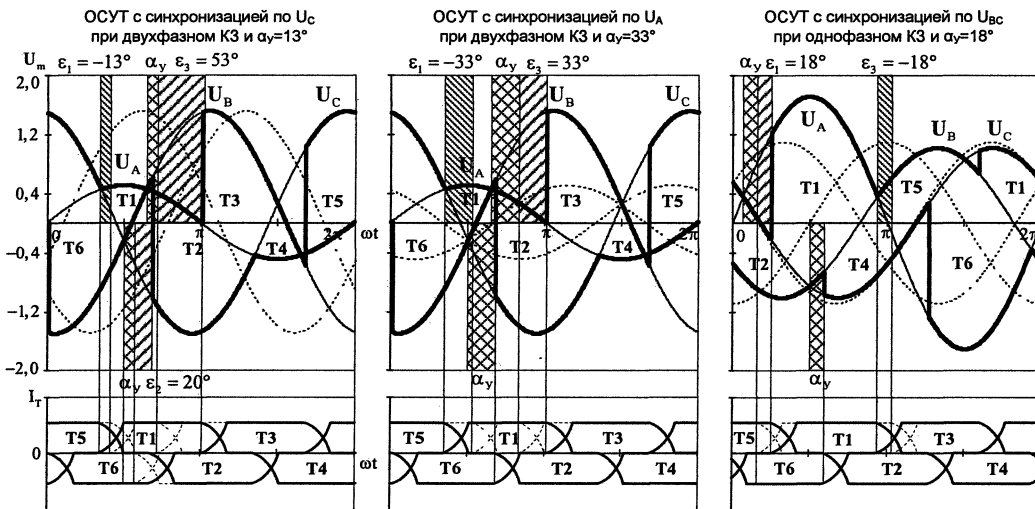
$$\left( |x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2| - |x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2| \right)^2 \leq 0, \text{ для } U_{C(A,B)}.$$

Отсюда следует, что синхронизация по напряжению  $U_{C(A,B)}$  не позволяет выровнять ИПТ при  $\alpha_y = 0$ . На рис. 5 изображены кривые напряжений анодной и катодной групп тиристоров СТС с ТСВ Y/D-11 для генератора ТГВ-200-2М при двухфазном и однофазном КЗ за блочным трансформатором.

Выравнивание ИПТ при остальных способах синхронизации возможно при условии, что угол управления тиристорами компенсирует углы преждевременной подачи импульсов управления  $\Delta\alpha_y = \max(\epsilon_1, \epsilon_{i+1}, \epsilon_{i-1})$  (рис. 6). В табл. 4 приведены минимальные значения углов управления



**Рис. 5.** Напряжения на элементах СТС генератора ТГВ-200-2М в режиме форсировки при нулевом угле управления (ТСВ Y/D-11)



**Рис. 6.** Напряжения на элементах СТС генератора ТГВ-200-2М в режиме форсировки при ненулевом угле управления (ТСВ Y/Y-12)

тиристорами для СТС генератора ТГВ-200-2М с ТСВ У/У-12, при которых наблюдается выравнивание ИПТ.

Таблица 4  
Минимальные углы управления ОСУТ, обеспечивающие выравнивание ИПТ при ТСВ У/У-12

Вид КЗ	Напряжение синхронизации					
	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>
K <sup>(2)</sup>	33	54	13	67	33	0
K <sup>(1,1)</sup>	16	29	4	32	16	0
K <sup>(1)</sup>	18	0	45	0	18	36

Примечание. Значения углов даны в эл. град.

**Выравнивание ИПТ при несимметричном синхронном управлении тиристорами.** Несимметричное пофазное управление позволяет формировать разные углы включения тиристоров в зависимости от фазы преобразователя, в которой они расположены. Запишем выражения для углов управления:

$$\begin{cases} \alpha_{y1,4} = \Delta\alpha_{yA} + \alpha_y, \\ \alpha_{y2,5} = \Delta\alpha_{yC} + \alpha_y, \\ \alpha_{y3,6} = \Delta\alpha_{yB} + \alpha_y. \end{cases} \quad (8)$$

В формуле (8) угол управления тиристором складывается из свободной составляющей  $\alpha_y$  и дополнительной задержки  $i$ -й фазы  $\Delta\alpha_{yi}$ , обеспечивающей выравнивание ИПТ.

Интервалы проводимости тиристоров без учета длительностей коммутаций:

$$\begin{cases} \Delta t_i = \pi - 2A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi+1} - \alpha_{yi}, \\ \Delta t_{i-1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi} - \alpha_{yi-1}, \\ \Delta t_{i+1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi-1} - \alpha_{yi+1}. \end{cases} \quad (9)$$

Запишем условие равенства ИПТ:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{yi+1} - \Delta\alpha_{yi} = 2A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{3}, \\ \Delta\alpha_{yi} - \Delta\alpha_{yi-1} = \Delta\alpha_{yi-1} - \Delta\alpha_{yi+1} = \frac{\pi}{6} + A(\alpha_\Phi). \end{cases} \quad (10)$$

Для расчета величин дополнительных задержек в соответствии с выражением (10) необходимо задаться значением для одного из углов. Из рис. 4 видно, что условием выравнивания ИПТ при КЗ и минимальных значениях  $\Delta\alpha_y$  будет равенство нулю  $\Delta\alpha_{yi}$  (или  $\Delta\alpha_{yi+1}$  для кривых, изображенных пунктирной линией). Формулы для расчета величин дополнительных задержек сведены в табл. 5.

Таблица 5  
Расчет величин дополнительных задержек включения тиристоров, обеспечивающих выравнивание ИПТ

Вид КЗ	Группа ТСВ	Угол		
		$\Delta\alpha_{yA}$	$\Delta\alpha_{yB}$	$\Delta\alpha_{yC}$
K <sup>(2)</sup> , K <sup>(1,1)</sup>	2, 8	$\gamma$	0	$2\gamma$
	4, 10	$2\gamma$	$\gamma$	0
	6, 12	0	$2\cdot\gamma$	$\gamma$
	3, 9 (9, 3)	0	$\gamma$	$2\gamma$
	1, 7 (11, 5)	$2\gamma$	0	$\gamma$
	5, 11 (7, 1)	$\gamma$	$2\gamma$	0
K <sup>(1)</sup>	2, 8	$-\gamma$	$-2\cdot\gamma$	0
	4, 10	0	$-\gamma$	$-2\gamma$
	6, 12	$-2\gamma$	0	$-\gamma$
	3, 9 (9, 3)	$-2\gamma$	$-\gamma$	0
	1, 7 (11, 5)	0	$-2\cdot\gamma$	$-\gamma$
	5, 11 (7, 1)	$-\gamma$	0	$-2\gamma$

Примечание.  $\gamma = A_m - \frac{\pi}{6}$ .

Из сравнения табл. 1 и 5 видно, что углы дополнительной задержки при несимметричном управлении совпадают с углами запаздывания включения тиристоров при симметричном управлении и соответствуют ОСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям.

### Выводы

Из приведенных выше исследований можно заключить, что выравнивание длительностей работы тиристоров в длительном режиме форсировки возможно при разных способах управления ТП. Условия выравнивания зависят как от вида и удаленности несимметричного КЗ, так и от величины угла управления в установившемся режиме. Все способы можно разделить на три категории: симметричное управление с выравниванием ИПТ при  $\alpha_y \geq 0$ , затем при  $\alpha_y \geq \Delta\alpha_y$  и выравнивание ИПТ при несимметричном управлении тиристорами. Применение каждого из подходов в МПС СУТ сводится к реализации соответствующего математического алгоритма, в связи с чем выбор того или иного подхода зависит только от особенностей текущего режима работы генератора. Результаты исследований могут быть использованы при разработке гибридных алгоритмов управления для МПС СУТ, использующих несколько принципов управления.

### Литература

1. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1987. – 344 с.
2. Гольдштейн, М.Е. Исследование работы системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких за-

мыканиях / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10. – №26(126). – С. 36–41.

3. Гольдштейн, М.Е. Влияние группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения синхронного генератора на ее работу при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков //

Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды Международной научно-технической конференции 12–15 мая. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 1.

4. Писарев, А.Л. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления) / А.Л. Писарев, Л.П. Деткин. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.

*Поступила в редакцию 12.01.2009 г.*

**Гольдштейн Михаил Ефимович** – заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Научные интересы связаны с развитием систем электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

**Goldstein Michael Efimovich.** Head of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronic systems, development of synchronous generator excitation systems, engineering education.

Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

**Горшков Константин Евгеньевич** – аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Окончил ЮУрГУ в 2006 г. по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Контактный телефон: 8-(351) 267-92-41.

**Gorshkov Konstantin Evgenievich.** Graduated from South Ural State University in the field of study «Relay protection and automation of electrical power systems». Post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University. Scientific interests: modeling and simulation of power electronics systems, synchronous generator excitation systems, transition processes.

Contact phone: 8-(351) 267-92-41.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПО СПЕКТРУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ\*

*А.В. Коржов*  
*г. Челябинск, ЮУрГУ*

## EXPERIMENTAL ESTIMATE OF POSSIBILITY TO CONTROL THE POWER CABLE ISOLATION CONDITION BY MEANS OF SPECTRUM OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN RADIO-FREQUENCY BANDWIDTH

*A.V. Korzhov*  
*Chelyabinsk, SUSU*

Приведены результаты экспериментальных исследований на действующих электроустановках интенсивности и спектрального состава радиопомех в заземляющем проводнике силового кабеля напряжением 6 кВ. Теоретически оценена мощность, выделяемая в изоляции силового кабеля от действия магнитной составляющей электромагнитного поля на токи утечки в изоляции.

*Ключевые слова:* силовая кабельная линия, ресурс, электрическое поле, магнитное поле, кабельная изоляция.

The article gives the results of experimental research at operating electrical installations of emission intensity and spectral distribution of radio frequency interference in bounding conductor of power cable with voltage of 6 kV. The power produced in isolation of the power cable due to effect of magnetic component of electromagnetic field upon leakage current in isolation is estimated theoretically.

*Keywords:* power cable line, resource, electric field, magnetic field, cable isolation.

Полагая, что силовой кабель под нагрузкой представляет собой практически линейную систему, действия электрического и магнитного полей рассматривают отдельно, используя принцип наложения. Учитывают воздействие электрического поля на свободные заряды в диэлектрике, приводящее к возникновению токов утечки, и поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе, влияющие на появление токов смещения. Анализируют явления, обусловленные магнитным полем: увеличение электрического сопротивления токопроводящих жил кабеля за счёт поверхностного эффекта; появление электродинамических усилий; магнитные потери в металлических оболочках кабеля.

Однако, на наш взгляд, процессы, происходящие в изоляции силового кабеля, необходимо рассматривать как результат воздействия единого электромагнитного поля, не разделяя его на электрическую и магнитную составляющие [1]. Данные процессы влияют на степень старения изоля-

ции в условиях эксплуатации силовых кабелей [2].

Частичные разряды, происходящие во включениях в изоляции, например в газовых включениях или по водным триингам, генерируют импульсные электрические сигналы. Данные сигналы распространяются по электрически связанным цепям и излучаются в виде электромагнитных волн в окружающую среду. Вопрос зависимости частотных характеристик сигналов частичных разрядов от дефектов в изоляции является дискуссионным. Как правило, частичные разряды в бумажно-масляной изоляции имеют короткую длительность и как следствие широкий частотный диапазон, перекрывающий практически все частоты до 1 ГГц.

Электропроводность технических диэлектриков обусловлена наличием небольшого числа свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева и старения изоляции в процессе эксплуатации. В режиме холостого хода при пере-

\*Исследования проведены с применением оборудования лаборатории электромагнитной совместимости Южно-Уральского государственного университета, приобретённого в рамках национального проекта «Образование».

## Электроэнергетика

менном напряжении сила, действующая на данные заряды, определяется интенсивностью электрического поля. В нагрузочных режимах работы силового электрического кабеля при протекании по жилам переменного тока на заряды в диэлектрике действуют электрическое и магнитное поля, обусловленные данным током. Результат их совместного действия, как известно, определяется результирующей силой, которую иногда также называют силой Лоренца [3]:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v}\vec{B}), \quad (1)$$

где  $\vec{F}$  – результирующая сила;  $q$  – алгебраическая величина движущегося заряда;  $\vec{E}$  – напряжённость электрического поля;  $\vec{v}$  – скорость движения заряда;  $\vec{B}$  – магнитная индукция поля, в котором движется заряд.

Для экспериментальной оценки влияния электромагнитного поля на интенсивность и спектральный состав утечек в изоляции кабеля в радиочастотном диапазоне нами были проведены исследования на действующих кабелях в городских электрических сетях. Исследования проводились в ячейках 6 кВ трансформаторных подстанций на заземляющем проводнике, идущем от оболочки силового кабеля (рис. 1). Использовалось поверенное оборудование: измерительный приёмник для измерения различного рода электромагнитных помех ESPI 3 ROND&SCHWARZ в диапазоне до 3 ГГц; антенна магнитная активная EMCO 6507, диапазон частот 1 кГц – 30 МГц; антенна электрическая активная, EMCO 3301 В, диапазон частот 1 кГц – 30 МГц; измеритель и анализатор электрического и магнитного полей EFA-300 NARDA в диапазоне частот 1 – 32000 Гц; поглощающие клещи MDS-21, предназначенные для измерения мощности промышленных радиопомех в сетях электропитания в радиочастотном диапазоне. Поглощающие клещи, охватывающие провод, содержат ферритовые поглотители энергии радиопомех. Спектрограммы снимались многократно при различном состоянии силового кабеля:

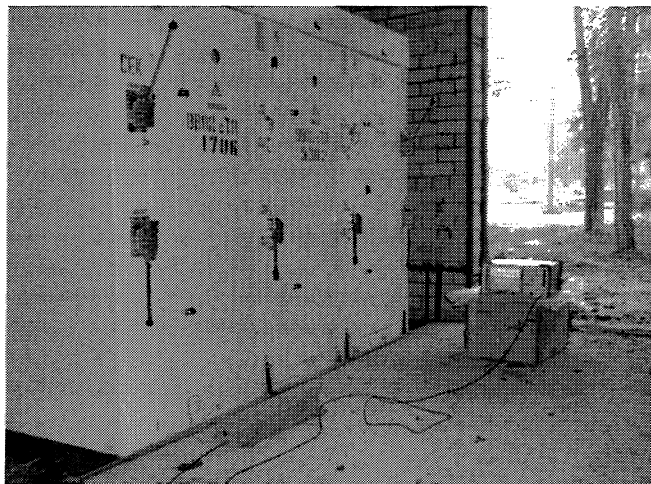


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований

кабель отключен; кабель под напряжением без нагрузки; кабель под напряжением и нагрузкой.

Отдельные результаты исследований на одном из кабелей марки ААШв сечением 3х120 мм<sup>2</sup> и длиной 660 м приведены на спектрограммах рис. 2–5.

Анализ экспериментальных спектрограмм (рис. 2–5) показал изменение мощности помех, снятых с заземляющего проводника КЛ, обусловленных как внешними источниками, так и утечками в изоляции (спектром частичных разрядов) от действия электрического и магнитного полей. Так, отмечается всплеск на частотах 9–20 МГц при включении кабеля под напряжение, кроме того наблюдается всплеск на 162 МГц. При нагрузке на кабеле в 40 А проявляются всплески на 460 и 591 МГц. Проводя анализ спектрограмм необходимо учитывать естественный шум, обусловленный радио- и телевизионными станциями, сотовую связь (она ярко проявляется на спектрограммах рис. 2–5 в районе 900 МГц). Практически во всех снятых спектрограммах наблюдалась разница спектров при включении кабеля под напряжение на холостом ходу и подключении кабеля под нагрузку.

Предположим, что в исходном состоянии к жилам кабеля приложено напряжение, но нагрузка отсутствует. Тогда под действием напряжённости поля на заряд будет действовать сила, определяемая равенством:

$$F_E = Eq. \quad (2)$$

Под действием этой силы свободные заряды в изоляции кабеля начинают перемещаться вдоль силовых линий напряжённости поля. Направления перемещения зарядов можно представить в виде элементарных проводников, по которым протекает ток утечки  $I_y$ .

Если по жилам кабеля протекает ток нагрузки, создающий вращающийся магнитный поток, то на элементарный проводник с током утечки будет действовать сила Ампера, определяемая равенством [3]:

$$F_A = Bl_y I_y, \quad (3)$$

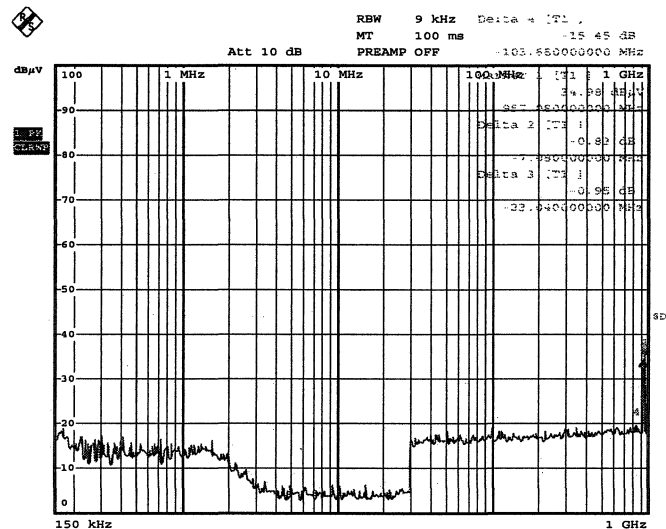


Рис. 2. Спектрограмма № 1, фон в ТП, наводки на клещах (клеммы без провода)

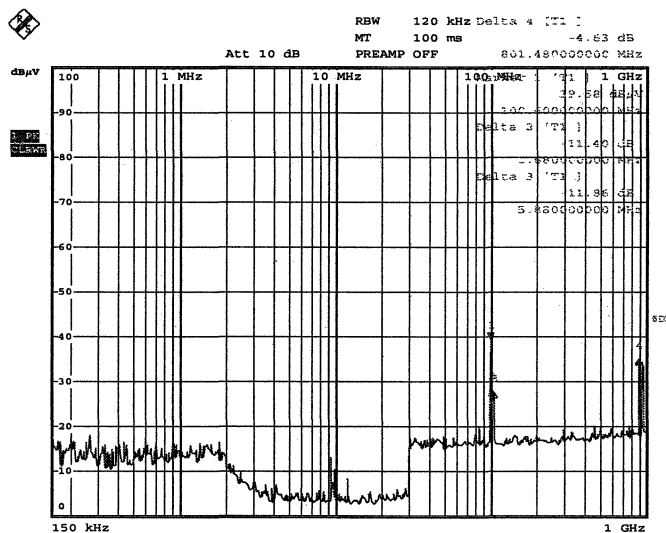


Рис. 3. Спектрограмма № 2, КЛ без напряжения

где  $l_3$  – длина элементарного проводника, равная расстоянию между жилами.

Вторая составляющая силы Лоренца (1), действующая на каждый заряд со стороны магнитного поля, и сила Ампера, действующая на элементарные проводники с током утечки, имеют одинаковую природу, так как упомянутые токи представляют собой направленное движение зарядов, на которые воздействует магнитное поле, обусловленное током нагрузки.

Для оценки степени разрушающего воздействия, связанного с воздействием на свободные заряды магнитного поля от тока нагрузки, рассмотрим сравнение по выделяемым активным мощностям как основополагающим в развитии пробоя диэлектрика и характеризующим рассеивание энергии электрического и магнитного полей в диэлектрике. Рассчитаем и проанализируем количественные выражения выделяемых активных мощностей за счёт воздействия кругового вращающе-

гося магнитного поля на свободные заряды в диэлектрике и за счёт электропроводности и диэлектрических потерь, обусловленных электрическим полем.

Ток утечки между двумя жилами кабеля, протекающий под действием номинального линейного напряжения, можно рассчитать:

$$I_{уф} = U_{ном} \omega C_{\phi}, \tag{4}$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота.

Тогда сила Ампера, действующая на элементарные проводники, по которым протекает ток утечки, обусловленный линейным напряжением между двумя соседними жилами, составит

$$F_{А\phi} = B l_3 I_{уф}. \tag{5}$$

Определим мощность, выделяемую при совершении работы по перемещению свободных зарядов (элементарных проводников с токами утечки) под действием магнитного поля.

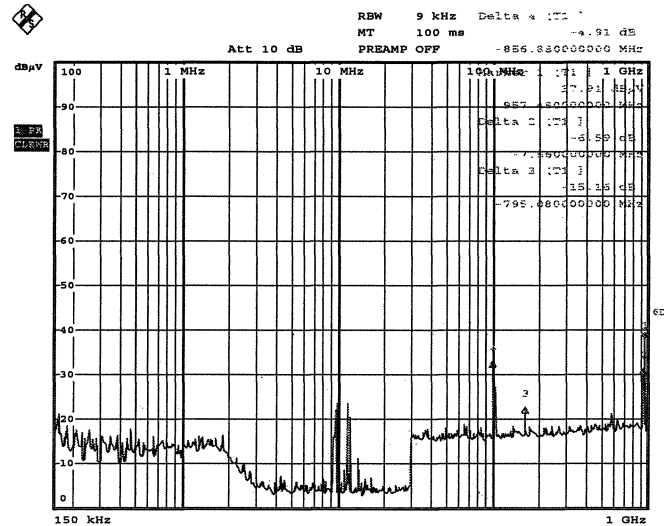


Рис. 4. Спектрограмма № 3, КЛ под напряжением без нагрузки

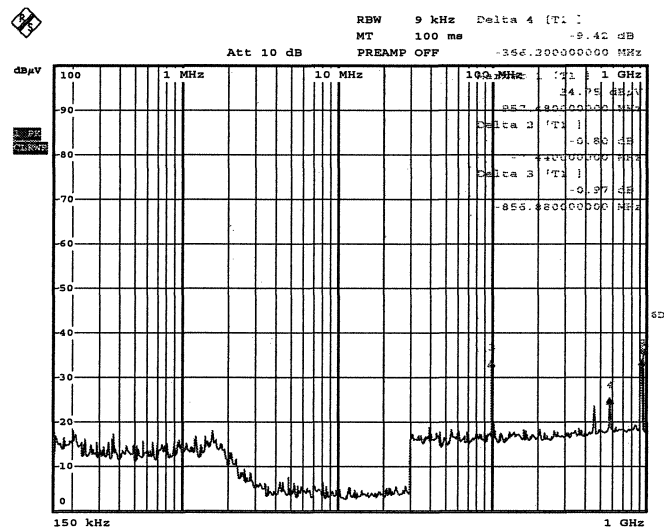


Рис. 5. Спектрограмма № 4, КЛ под напряжением, нагрузка 40 А

Так как токи утечки протекают вдоль силовых линий напряжённости электрического поля, то длина элементарного проводника с током утечки равна толщине изоляции. Вектор магнитной индукции при этом перпендикулярен вектору напряжённости поля и направлению протекания тока утечки. Сила по перемещению зарядов направлена по правилу левой руки, то есть вдоль оси кабеля. Для определения данной мощности можно провести аналогию с определением электромагнитной мощности при вращательном движении ротора электрической машины, определяемой по рекомендациям [4]:

$$P_{\text{эм}} = \omega M_{\text{эм}}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент.

Значение электромагнитного момента определяется произведением силы Ампера  $F_A$ , действующей на проводники обмотки ротора, на радиус ротора:

$$M_{\text{эм}} = F_A \frac{D_p}{2}, \quad (7)$$

где  $D_p$  – диаметр ротора.

Тогда выражение электромагнитной мощности можно представить в виде

$$P_{\text{эм}} = \pi f F_A D_p. \quad (8)$$

Таким образом, мощность, выделяемая при совершении работы по перемещению свободных зарядов под действием магнитного поля, равна произведению длины перемещения, частоты сети и силы, воздействующей на заряды.

Поскольку перемещение зарядов осуществляется вдоль длины кабеля под действием силы Ампера, то

$$P_A = I_{\text{ж}} f F_A. \quad (9)$$

Мощность, выделяемая активной составляющей тока утечки в промежутках между жилами, можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{Еф}} = U I_{\text{уф}} \text{tg } \delta. \quad (10)$$



Таким образом, наличие нагрузки в жилах кабеля приводит к созданию кругового вращающегося магнитного поля, вызывающего магнитные потери в оболочке кабеля и к дополнительному воздействию на изоляцию.

Разрушающее воздействие на диэлектрик магнитного поля, вероятно, схоже и соизмеримо с действием электрического поля и, следовательно, связано с усилением электрохимических процессов, приводящих к изменениям в структуре диэлектрика и развитию пробоя. Наличие магнитного поля увеличивает износ изоляции в рабочих режимах на несколько процентов по сравнению с износом от действия электрического поля [1]. При этом, за время действия устройств релейной защиты при протекании токов двух и трёхфазного короткого замыкания, кабель будет испытывать разрушающее воздействие от магнитного поля, соизмеримое с действием электрического поля. Изгиб кабеля или наличие реактивной составляющей нагрузки кабеля приведёт к изменению взаимного

расположения вектора напряжённости электрического поля и вектора магнитной индукции, что повлияет на изменение значений токов утечки как между фазами, так и между жилами и оболочкой и изменит соотношение разрушающего воздействия на изоляцию электрического и магнитного полей.

Для оценки возможности контроля состояния изоляции, используя метод регистрации спектра электромагнитного поля, дистанционным способом оценивалось электромагнитное поле непосредственно в трансформаторной подстанции и на удалении в 10 м от неё. Измерения проводились над сборными шинами, делая попытку установить суммарные импульсы частичных разрядов всех отходящих силовых кабелей данной трансформаторной подстанции, некоторые результаты приведены на рис. 6–8.

На рис. 8–9 представлены спектрограммы над кабельной линией (типа ААБл 3х150 мм<sup>2</sup>) и дефектной муфтой (типа ЗСТП – 10/120-240), смонтированной на данном кабеле, при токе в 40 А.

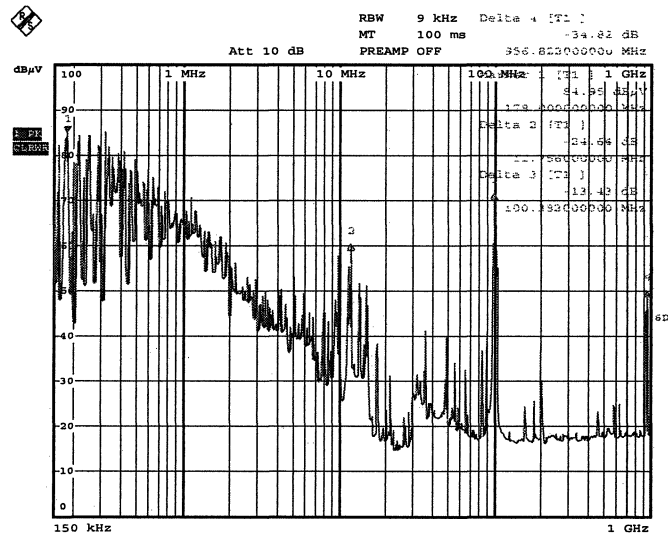


Рис. 6. Спектрограмма электрического поля на улице

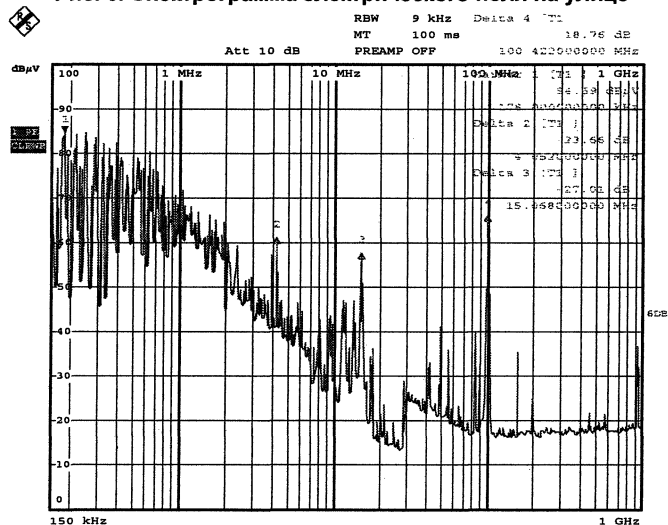


Рис. 7. Спектрограмма электрического поля над сборными шинами 6 кВ в трансформаторной подстанции

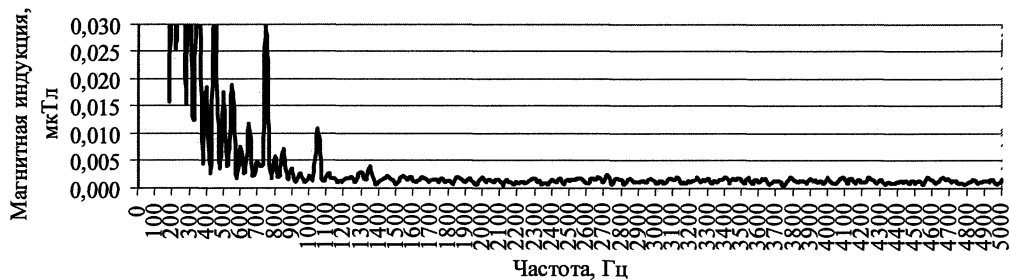


Рис. 8. Спектрограмма магнитного поля над кабелем в диапазоне частот 5–5000 Гц

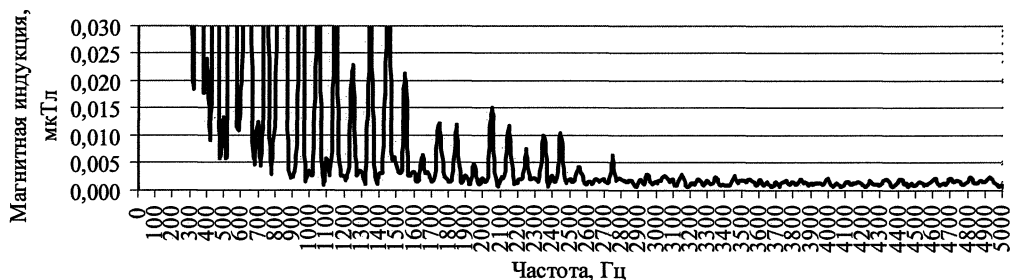


Рис. 9. Спектрограмма магнитного поля над муфтой в диапазоне частот 5–5000 Гц

Анализ спектрограмм рис. 6–7 показал, что использование методик оценки ресурса изоляции силового кабеля по спектру электромагнитного излучения при контроле непосредственно на трансформаторной подстанции, а не над местом дефекта рис. 8–9, затруднено ввиду короткой длительности импульса помех от разрядов в изоляции, внешних и внутренних помех в электрической сети, затухания сигналов в длинных сетях. Отсутствуют статистические массивы данных, определяющие связь спектра электромагнитного поля с видом дефекта в изоляции.

### Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что электромагнитная обстановка вблизи силовых кабелей напряжением 6–10 кВ определяется широкополосным излучением: от гармоник частоты электропитания и от утечки по изоляции КЛ.

2. Теоретические и экспериментальные исследования показали необходимость учёта совместного воздействия переменного электрического и магнитного полей на процессы, происходящие в изоляции силового кабеля.

3. Необходимо проведение дальнейших ресурсных исследований по определению влияния

магнитной составляющей электромагнитного поля на состояние изоляции силового кабеля.

4. Предполагается продолжить исследования по выявлению связи между интенсивностью и спектральным составом внешнего электромагнитного поля силового кабеля и возможными дефектами изоляции. Указанные массивы должны включать в себя следующие данные: физические характеристики спектрального состава в широком диапазоне частот магнитного и электрического полей; составляющие векторов напряжённости поля по координатам  $x, y, z$ .

### Литература

1. Коржов, А.В. Действие магнитного поля кабеля 6–10 кВ на собственную изоляцию / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.В. Томашева // *Электричество*. – 2009. – № 1. – С. 46–53.
2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский. – *Электрические станции*. – 2008. – № 8. – С. 40–47.
3. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1979.
4. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978.

Поступила в редакцию 10.12.2008 г.

**Коржов Антон Вениаминович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов: электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка остаточного ресурса изоляции силовых кабелей. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

**Korzhev Anton Veniaminovich**. Candidate of technical sciences, associate professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: electromagnetic processes in cable set, estimation of the remaining resource of power cables insulation. Contact telephone: 007-(351) 267-92-46.

## СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НУЛЕВОГО ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 0,4 кВ

*К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов\*, А.И. Сидоров\*\**  
*\*г. Чита, ЧГУ, \*\*г. Челябинск, ЮУрГУ*

## THE WAY OF AUTOMATIC CONTROL OF ZERO WIRE PARAMETERS OF 0.4 kV AIRLINES

*K.S. Serezhin, I.F. Suvorov, A.I. Sidorov*  
*Chita, ChSU, Chelyabinsk, SUSU*

Разработанный способ автоматического контроля параметров нулевого провода основан на качественном анализе распределения токов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей, измерении разности тока в нулевом проводе в начале линии и тока в нулевом проводе за первым повторным заземлителем, осуществлении автоматического контроля целостности нулевого провода, определении места обрыва нулевого провода.

*Ключевые слова:* нулевой провод, распределение токов, место обрыва.

The developed way of automatic control of zero wire parameters is based on the qualitative analysis of current distribution through the zero wire, measurement of current difference in the zero wire in the beginning of the line and in the zero wire behind the first repeated ground wire, realization of the automatic control of integrity of zero wire, and definition of the place of breakage of the zero wire.

*Keywords:* zero wire, current distributions, place of breakage.

Практика эксплуатации линий электропередачи 0,4 кВ показала, что основными причинами обрыва нулевого провода являются:

- длительное однофазное короткое замыкание в конце длинной линии, приводящее к отгоранию нулевого провода в местах контактных соединений;
- постепенное электроэрозионное разрушение нулевого провода при схлестывании с фазным в местах наибольшей стрелы провеса.

При несимметричной нагрузке обрыв или увеличение сопротивления системы «нулевой провод-земля» вызывает появление у потребителей значительных перенапряжений в наименее нагруженных фазах, что приводит к массовому выходу из строя оборудования потребителей и возникновению электро-, пожаро- и взрывоопасных ситуаций.

Обеспечение непрерывности нулевого провода предполагает постоянный контроль за его состоянием и параметрами и в случае аварии отключение отходящей линии от трансформаторной подстанции.

Известен способ определения повреждения нулевого провода в сетях 0,4 кВ путем определения сопротивления петли фаза-нуль [1].

Основным недостатком при измерении сопротивления петли фаза-нуль является невозможность точно определить, чем вызвано увеличение суммарного сопротивления петли фаза-нуль: обрывом нулевого провода или недопустимым увеличением

сопротивления фазных проводов, а также невозможностью организации постоянного автоматического контроля указанных аварийных состояний.

Существует устройство, использующее наложение на напряжение сети оперативного постоянного тока и предназначенное для контроля зануления конкретной электрической установки [2], содержащее основной трехфазный дроссель, источник оперативного постоянного тока, дополнительный трехфазный дроссель и реагирующий орган.

Недостатком устройства, использующего наложение на напряжение сети оперативного тока, является контроль непрерывности лишь одного участка цепи зануления, а кроме того, ухудшение качества электроэнергии.

Известно также устройство контроля непрерывности заземляющего провода передвижных горнодобывающих электроустановок [3], включающее блок приема импульсов, установленный на питающей подстанции, где находится центральный заземлитель, который посылает в сеть опросные импульсы, каждый из которых предназначен для запуска соответствующего блока передачи импульсов, установленного на той или иной передвижной электроустановке. Блок передачи импульсов по контуру нулевой последовательности или по цепи (сопротивление самозаземления – грунт – центральный заземлитель – совокупность фазных проводов) передает на блок приема им-

пульсы, которые дешифруются и преобразуются в контрольный сигнал. Величина этого контрольного сигнала и является критерием непрерывности цепи заземления.

Недостатками известного способа и устройства являются:

– ухудшение качества электроэнергии в данной сети из-за прохождения импульсного тока через совокупность фазных проводов;

– за счет временного ограничения полосы пропускания нарушается импульсный характер сигнала, импульсный сигнал конечной длительности «расплывается», переходные процессы в канале продолжаются после выключения  $i$ -го сигнала и происходит наложение сигналов, что приводит к ухудшению чувствительности;

– контроль параметров нулевого провода по каждой защищаемой линии производится через некоторые промежутки времени, длительность которых зависит от количества защищаемых линий, т.е. контроль осуществляется непостоянно.

Известен способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ [4], включающий пропускание высокочастотных импульсов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей защищаемых линий, прием импульсов, их дешифрацию, регистрации амплитуды импульсов и подачу сигнала на отключение линии при значениях амплитуды импульсов ниже определенной величины, когда через каждую защищаемую линию осуществляется непрерывная передача импульсов определенной частоты, отличающейся на 200 Гц для соседних каналов частоты. А перед дешифрацией дополнительно производят измерения частоты и разделение спектра сигналов по исходным полосам частот, определяют амплитуды импульсов, соответствующих каждой линии, и при уменьшении амплитуды импульсов более чем на 15 % от амплитуды импульсов в нормальном режиме работы производят отключение линии с нарушенными параметрами нулевого провода.

Недостатки данного способа:

– ухудшение качества электроэнергии в данной сети за счет пропускания высокочастотных импульсов через нулевой провод и совокупность повторных заземлителей;

– необходимость дополнительной установки фильтров, препятствующих попаданию высокочастотных импульсов в цепь нагрузки;

– высокая сложность и стоимость устройства.

Наиболее близким к этому способу по технической сущности является устройство контроля непрерывности нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ, в основу которого положен принцип сравнения тока  $I_{01}$  в нулевом проводе в начале линии и тока  $I_3$  в заземлении нейтрали питающего трансформатора [5]. Как было установлено, в нормальном режиме работы сети при любом распределении нагрузки между линиями величина тока

$I_{01}$  всегда больше величины тока  $I_3$ . При нарушении непрерывности нулевого провода соотношение  $I_{01} > I_3$  нарушается, что и используется для обнаружения возникновения аварийной ситуации и выработки сигнала, который подается на исполнительный механизм, отключающий неисправную линию.

Недостатком этого устройства является малая зона контроля, так как оно надежно работает на длинах до 500 м. Согласно анализу схем городских электросетей длина отдельных линий распределительных сетей 0,4 кВ не превышает 300–400 м. Поэтому в городских условиях зоны действия 500 м достаточно, а в сельской местности зачастую нет, так как линии 0,4 кВ в сельской местности могут достигать длин порядка 1,5–2 км.

Техническим результатом настоящего изобретения является повышение качества контроля непрерывности и параметров нулевого провода, увеличение достоверности определения места его обрыва.

Технический результат достигается тем, что способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ основан на измерении и использовании соотношения тока  $I_{01}$  (в нулевом проводе в начале линии) и тока  $I_{02}$  (в нулевом проводе за первым повторным заземлителем). В нормальном режиме работы сети между током в нулевом проводе в начале линии и током в нулевом проводе за первым повторным заземлителем существует определенное соотношение, зависящее от физических параметров сети, которое может быть рассчитано для каждой конкретной сети. При обрыве нулевого проводника величина токов изменяется.

Отличительной особенностью данного способа является измерение разности токов  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  и анализ данной величины для получения информации об обрыве нулевого провода. Если значение разности токов  $\Delta I_0$ , подаваемое в вычислительный блок, превышает значение, измеренное для нормального режима с учетом колебания несимметрии нагрузки и сезонности колебаний сопротивлений повторных заземлений, блок принятия решения генерирует сигнал на отключение, подаваемый на исполнительный механизм.

Сущность предлагаемого устройства поясняется на рисунках. На рис. 1 представлена схема замещения участка, на рис. 2 – графики изменения токов по участкам нулевого провода при обрывах на каждом из них, на рис. 3 – график изменения  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  в зависимости от места обрыва нулевого провода:  $\Delta I_0 = F(L_{обр})$ .

Дополнительное измерение разности токов  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  позволяет также определить предполагаемое место обрыва с учетом заданной погрешности.

Результаты исследований на математической и физической моделях электрической сетей при обрыве нулевого провода представлены на рис. 2.

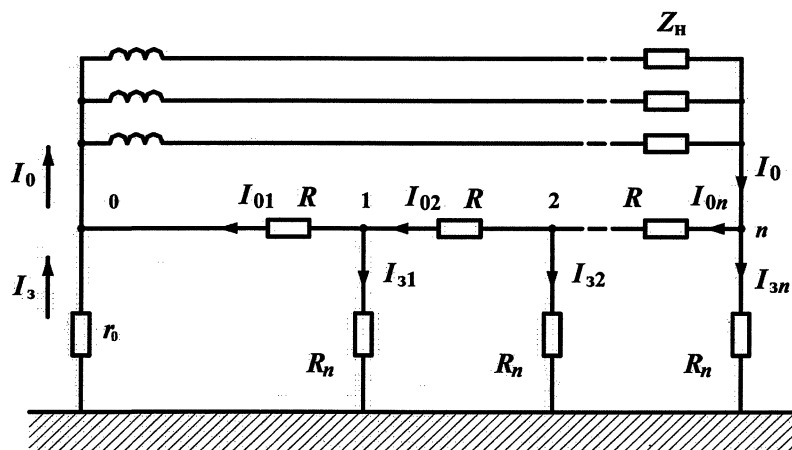


Рис. 1. Схема замещения участка сети 0,4 кВ

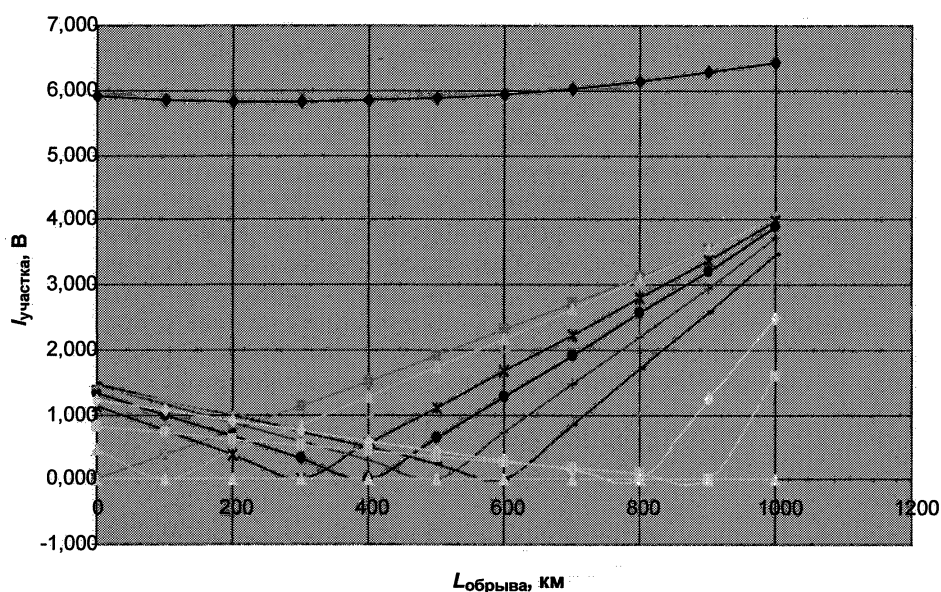


Рис. 2. Графики изменения токов по участкам нулевого провода

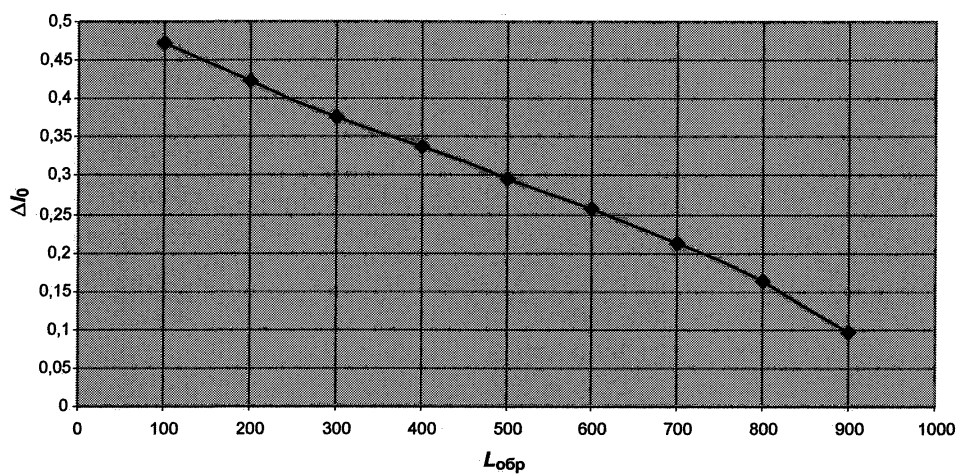


Рис. 3. График  $\Delta I_0 = F(L_{обр})$

Зависимость разности токов от места обрыва

$L_{обр}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\Delta I_0$	0,473	0,422	0,377	0,336	0,296	0,257	0,214	0,164	0,097

Условия моделирования:

- воздушная линия,
- провод А-25,
- длина 1 км,
- 10 повторных заземлителей через 100 м.

В таблице и на рис. 2 представлено изменение  $\Delta I_0 = F(L_{обр})$ .

В нормальном режиме работы данной воздушной линии  $\Delta I_0 = 0,017$  А. Таким образом, для обеспечения чувствительности устройства при обрывах нулевого провода в любом месте по длине следует для данной воздушной линии выбрать уставку срабатывания устройства 0,1 А.

Согласно предложенному способу за счет непрерывного измерения разности токов  $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$  осуществляется автоматический контроль целостности нулевого провода, а за счет предварительного графического анализа изменения  $\Delta I_0$  в зависимости от места обрыва представляется возможным определение места обрыва нулевого провода с учетом заданной погрешности.

Предложенный способ позволяют повысить электробезопасность при эксплуатации электрических сетей 0,4 кВ за счет постоянного автоматического контроля, минимального времени определения аварийной ситуации и дополнительного определения места обрыва нулевого провода.

## Литература

1. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 344 с.
2. А.с. 845115 СССР, МКИ Н 02 Н 3/17, 5/12. Устройство для контроля целостности заземляющей цепи передвижных электроустановок / Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров (СССР). – № 279737/18-21; заявл. 09.07.79; опубл. 07.07.81, Бюл. № 25.
3. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: автореф. дис... д-ра техн. наук / А.И. Сидоров. – Кемерово, 1994. – 38 с.
4. А.с. 2295186 РФ, МПК Н 02 Н 5/00. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода и устройство для его осуществления / И.Ф. Суворов, К.С. Серёжин, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров (РФ). – № 2005140871/09; заявл. 26.12.2005; опубл. 10.03.2007, Бюл. № 7.
5. А.с. 2230415 РФ, МПК 7 Н 02 Н 5/10, G 01 R 31/02. Устройство контроля непрерывности нулевого проводника в воздушных линиях 0,4 кВ / Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров (РФ). – № 2002127852/28; заявл. 17.10.2002; опубл. 10.06.2004, Бюл. № 16.

Поступила в редакцию 15.05.2008 г.

**Серёжин Константин Сергеевич** – аспирант кафедры электроснабжения Читинского государственного университета. Область научных интересов: теоретическая электротехника, электробезопасность, качество электроэнергии. Контактный телефон: 8-(3022)-41-66-41.

**Serezhin Konstantin Sergeevich**. Post-graduate student of the Electric Supply department of Chita State University, Chita. Scientific interests: theoretical electrical engineering, electrical safety, quality of the electric power. Contact telephone: 8- (3022) -41-66-41.

**Суворов Иван Флегонтович** – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения Читинского государственного университета. Область научных интересов: распределение электроэнергии, электробезопасность, качество электроэнергии, энергосбережение. Контактный телефон: 8-(3022)-41-66-41.

**Suvorov Ivan Flegontovich**. Doctor of technical science, professor of the Electric Supply department of Chita State University, Chita. Scientific interests: distribution of electric power, electrical safety, quality of the electric power. Contact telephone: 8- (3022) -41-66-41.

**Сидоров Александр Иванович**. Доктор технических наук, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: теоретическая электротехника, электробезопасность, качество электроэнергии, энергосбережение. Контактный телефон: 8-(351)-267-90-65.

**Sidorov Alexander Ivanovich**. Doctor of technical science, professor of the Electric Supply department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: theoretical electrical engineering, electrical safety, quality of the electric power. Contact telephone: 8- (351) -267-90-65.

## ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ВЕНТИЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

*А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн, Р.А. Шаипов*  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## SERVICEABILITY OF VALVE EXCITEMENT SYSTEMS OF SYNCHRONOUS GENERATOR

*A.N. Andreev, M.E. Goldstein, R.A. Shaipov*  
Chelyabinsk, SUSU

На основе статистических данных проведён анализ причин отказов систем возбуждения синхронных генераторов. Рассмотрена динамика соотношения отказов силовой части и системы управления возбуждением. Показано, что применение резервных систем возбуждения и 100 % резервирования в силовой части требует проведения дополнительных исследований электромагнитных процессов.

*Ключевые слова:* надежность, отказ, резервирование, система возбуждения генератора, система управления возбуждением, полупроводниковый преобразователь.

On the base of statistical data the analysis of fault reasons of excitement systems of synchronous generator is made. The dynamics of proportion of power part and excitement control system is considered. It is shown that usage of reserve ES and 100% backup in power part requires undertaking the additional studies of the electromagnetic process.

*Keywords:* reliability, failure, backup, generator excitation system, excitation control system, semiconductor converter.

1. Статистика отказов систем возбуждения синхронных генераторов. Система возбуждения (СВ) состоит из комплекта оборудования, предназначенного для создания в обмотке возбуждения синхронного генератора автоматически регулируемого постоянного тока в различных его режимах [1]. Состав систем возбуждения определяется предъявляемыми к ним требованиями и теми параметрами, которые они должны обеспечить, а их классификация – принципиальными отличиями источников питания, структурой силовых схем преобразователя и применяемых в нём вентилей, конструкцией основного оборудования. Вентильная СВ включает возбудитель (генератор переменного тока или трансформатор, преобразователь); АРВ; коммутационную аппаратуру; измерительные датчики и приборы; средства защиты оборудования системы возбуждения от повреждений, вызванных перенапряжениями, сверхтоками, неисправностями системы охлаждения, возможными перегрузками, устройство начального возбуждения и ввод резервного возбуждения [2]. Отказы этих элементов могут привести к частичному или полному отказу системы возбуждения.

На протяжении длительного времени сбор сведений о технологических нарушениях в работе турбо- и гидрогенераторов и анализ их причин

выполнялся фирмой ОРГРЭС, а затем ПО «Союзтехэнерго». Анализ обзора аварий синхронных генераторов по данным [3, 4, 5, 6, 7], дополненным информацией об отказах СВ девяти синхронных генераторов Троицкой ГРЭС, показывает, что в среднем около 20 % технологических отказов в работе турбогенераторов (а по данным исследовательского комитета СИГРЭ до 32 % [8]) происходит из-за нарушений в работе систем возбуждения (см. таблицу).

Из графика (см. рисунок), построенного по данным таблицы, видно, что с 1960-го года наблюдается тенденция к увеличению доли отказов СВ. Одной из причин этого является внедрение и всё более широкое применение вентильных систем возбуждения: с 60-х годов XX в. – высокочастотных диодных, а затем диодных бесщёточных и тиристорных. Обладая более высокими функциональными свойствами, чем электромашинные СВ, они состоят из технически более сложного оборудования и требуют значительных трудозатрат эксплуатационного и ремонтного персонала для поддержания их в работоспособном состоянии. Это снижает надёжность их работы. Статистические данные показывают, что нарушения в работе СВ в большинстве случаев ведут к отказу генератора и в значительной степени определяют его надёжность.

# Электроэнергетика

Данные по отказам турбогенераторов из-за нарушений в работе систем возбуждения за период 1960–1996 гг.

Год	Всего отказов	Отказы из-за нарушений в работе СВ		Год	Всего отказов	Отказы из-за нарушений в работе СВ	
		количество	%			количество	%
1960	107	–	22,4	1976	287	–	18
1961	127	–	16	1977	384	–	13
1962	151	–	13	1978	360	–	24
1963	–	–	17	1979	448	–	23
1964	161	–	13,1	1980	468	–	16
1965	159	–	13,8	1981	436	104	23,9
1966	157	–	19	1982	436	108	24,8
1967	136	–	19	1987	594	130	21,9
1968	170	–	18	1988	499	113	22,6
1969	177	–	22	1989	551	134	24,3
1970	189	–	21	1990	396	67	16,9
1971	177	–	19	1991	453	78	17,2
1972	184	–	15	1992	174	45	25,9
1973	228	–	14	1995	189	49	25,9
1974	224	–	18	1996	201	34	16,9
1975	240	–	20				

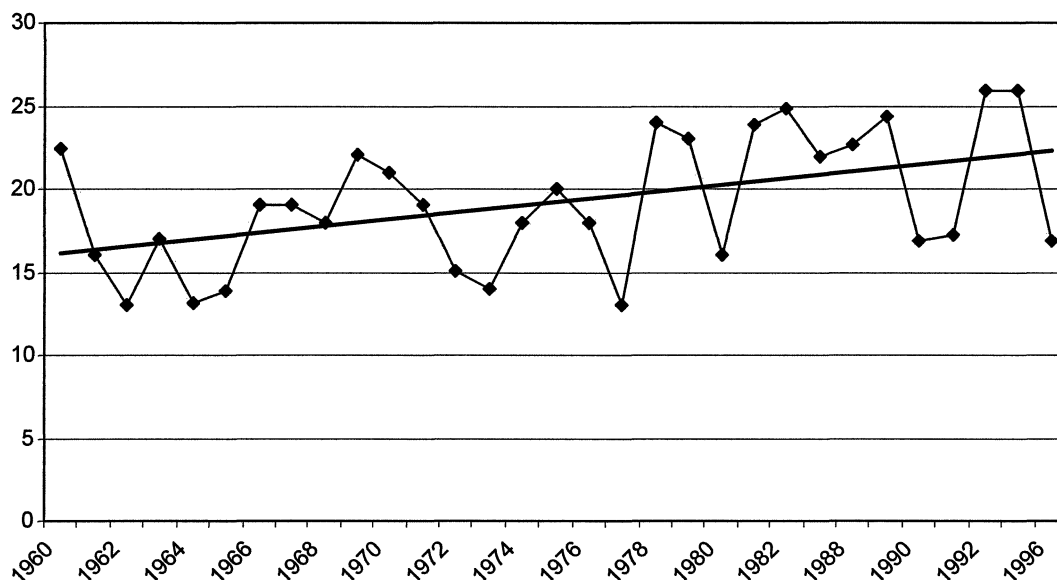


График доли отказов СВ в 1960–1996 гг.

**2. Анализ причин отказов СВ.** Анализ причин повреждений СВ за ряд лет [7] показал, что большое их количество связано с неправильной эксплуатацией, схемными, функциональными и конструктивными недоработками СВ.

Эти дефекты – результат воздействия человека на стадиях разработки, монтажа и эксплуатации системы относят к организационным причинам возникновения отказов. Их доля в общем числе отказов велика. Действительно, в 1995 году [6] из 189 отказов турбогенераторов 49 (26 %) было вызвано нарушениями в работе систем возбуждения. Из них 35 % вызваны организационными причинами. В 1996 году доля организационных причин составила 50 % [7].

При разработке и эксплуатации систем возбуждения возникновения организационных при-

чин стремятся не допускать. Фактически они являются ошибками разработчиков и эксплуатационников. Разнообразный характер организационных причин обычно не зависит от схемных, конструктивных, функциональных особенностей СВ, параметров режима эксплуатации, поэтому их учёт на стадии проектирования может быть произведён только на основе статистических данных эксплуатации. На их основе должны вырабатываться и соответствующие меры организационного характера, повышающие надёжность СВ.

Отказы систем возбуждения могут быть полными или частичными. При частичном отказе СВ не может полностью обеспечить все режимы генератора, однако он остаётся в работе. При полном отказе система возбуждения не может выполнять свои функции, поэтому генератор отключается



либо переводится на резервное возбуждение. При отказе СВ и потере возбуждения генератор переходит в асинхронный режим. В таком режиме ряд генераторов способны выдавать активную мощность в сеть, потребляя из неё реактивную. Так как последствия отказа СВ в данном случае ниже, то при наличии на станции резервной системы возбуждения и возможности длительной работы генератора в асинхронном режиме требования к надёжности системы возбуждения снижаются. Это обычно относится к генераторам небольшой мощности. Рассмотрим причины и последствия отказов элементов СВ, которые могут привести к частичному или полному отказу системы возбуждения. Для этого выделим в составе систем силовую часть и систему управления возбуждением (СУВ). Основные структурные единицы силовой части: источник питания – вспомогательный генератор, выпрямительный трансформатор, шины собственных нужд станции или их комбинации; преобразовательная часть; коммутационная аппаратура.

Нарушения в работе трансформаторов и вспомогательных генераторов, входящих в состав систем возбуждения, типичны для этих элементов. Отказ источника питания ведёт к полному отказу системы возбуждения. Для минимизации ущерба, вызванного повреждением источника питания в аварийной ситуации, а следовательно, и времени восстановления, используются типовые для этих элементов защиты.

Преобразовательная часть в простейшем случае состоит из одного одногруппового (выполненного по трёхфазной мостовой схеме) преобразователя. В плече преобразователя может быть включен один полупроводниковый вентиль или несколько параллельных вентиляльных ветвей для обеспечения нормируемой нагрузки по току. В ветви последовательно могут включаться несколько вентилялей для обеспечения нормируемого значения напряжения на вентиле. Отказ вентиля наступает при тепловом пробое или пробое из-за превышения допустимого значения напряжения. В некоторых случаях пробой тиристоров может произойти как следствие отказа защитных RC-цепей или выхода из строя выходных блоков системы управления тиристорами (в тиристорных СВ). При пробое всех вентилялей, входящих в состав ветви, наступает её отказ. Для отключения отказавшей ветви последовательно с вентилями включаются быстродействующие предохранители. В системах возбуждения небольшой мощности, в которых преобразователи выполняются без параллельных ветвей, предохранители могут включаться не в ветви, а в фазные шины. Для повышения надёжности в плечи преобразователя включаются резервные параллельные ветви. Также устанавливаются резервные последовательные вентиляли с целью предотвращения недопустимого повышения напряжения. ГОСТ [1] допускает выход из строя некоторого количества параллельных ветвей, при

котором наступает частичный отказ – ограничение режима возбуждения генератора. Если количество отказавших ветвей в любом плече преобразователя превысит допустимое значение, то произойдёт отказ преобразователя.

Возможны отказы и предохранителей – обычно это перегорание плавкой вставки при рабочем значении тока и соответственно ложное отключение. В некоторых случаях предохранитель не справляется с отключением тока короткого замыкания: происходит разрыв его оболочки с выбросом дуги в шкаф преобразователя с последующими перекрытиями между шинными соединениями. Это развивающееся короткое замыкание. Для таких аварий характерен высокий уровень повреждений и в результате этого длительный ремонт. Для предотвращения развития аварий вследствие таких отказов предохранителей разработана специальная защита [9].

В некоторых СВ, например, новых систем возбуждения генераторов Зейской ГЭС, для повышения надёжности вместо предохранителя последовательно в ветвь включается диод высокого класса по напряжению. Так как диоды обладают меньшим чем тиристоры временем выключения, то в момент коммутации основное перенапряжение приходится именно на него, что разгружает тиристор и увеличивает срок его службы. При пробое тиристора ветвь преобразователя останется в работе, что повышает общую надёжность преобразователя.

Для отвода тепла от вентилялей в преобразователях СВ применяют естественное воздушное, принудительное воздушное или водяное охлаждение. Отказ систем охлаждения выражается в уменьшении потока охлаждающего агента через охладители вентилялей, что приводит к их перегреву и последующему тепловому пробое, и, как следствие, отказу преобразователя. В системах водяного охлаждения также возможны течи воды из контура охлаждения, которые приводят к перекрытию изоляции и отказу преобразователя.

Коммутационные аппараты, присутствующие в цепях постоянного тока СВ, выполняют функции устройства гашения поля (УГП). Отказ УГП во время гашения поля может вести либо к полному отказу СВ, либо к частичному в зависимости от типа СВ и условий гашения поля. Если СВ позволяет произвести гашение поля каким-либо другим способом (например, переводом преобразователя в режим инвертирования), то отказ УГП приводит к частичному отказу СВ. В противном случае к полному. Следует отметить, что отказ СВ в гашении поля обычно ведёт к серьёзным повреждениям генератора и оборудования самой СВ.

Системы возбуждения, производимые до конца 90-х годов, оснащались системами управления возбуждением, выполненными на полупроводниковой элементной базе. Такие СУВ включали в себя измерительные датчики и приборы, устройст-

во автоматического регулирования возбуждения (АРВ), систему управления тиристорами, аппаратуру управления, сигнализации и защиты. С переходом на микропроцессорную элементную базу функции АРВ, управления, защиты и сигнализации стали выполняться программно на микропроцессорном контроллере. Частичный отказ контроллера может вести как к частичному, так и к полному отказу СУВ и СВ. Полный отказ контроллера ведёт к полному отказу СУВ и СВ в целом, поэтому предпринимаются различные меры по повышению его надёжности путём резервирования: дублирование по питанию, использование двухпроцессорных контроллеров и др. Производителями предлагаются варианты установки двух контроллеров – один из которых полноценный, а второй с меньшим набором функций выполняет роль резервного, позволяя в случае отказа первого сохранить СВ в работе. Также существуют варианты исполнения СУВ со 100 %-ным резервированием, т.е. установкой двух полноценных контроллеров. При выходе из строя измерительных датчиков и приборов и сохранении предшествующего режима управления вентилями, можно оставить генератор в работе. В таком случае отказ СУВ является частичным.

В СУВ современных систем возбуждения реализуется значительное количество защит как самой СВ, так и цепей ротора генератора. Отказы защит возникают при ложном их срабатывании, а также при несрабатывании в аварийной ситуации. Ложное срабатывание, приводящее к отключению СВ, ведёт к отказу СВ. Несрабатывание защиты в аварийной ситуации приводит к повреждению оборудования СВ и генератора и является отказом СВ.

Если в СВ применяется один мост, то при его выходе из строя наступает отказ СВ. Поэтому для повышения надёжности в таких СВ используется 100 %-ное резервирование в преобразовательной части. При этом один преобразователь находится в работе, а второй, находящийся в горячем резерве со снятыми импульсами управления, вступает в работу при отказе первого. Однако электромагнитные процессы при аварийном переводе с одного преобразователя на другой требуют дополнительного изучения. Для повышения эксплуатационных параметров преобразовательная часть СВ может выполняться из нескольких параллельно работающих мостов. Впервые такой способ резервирования был опробован в СВ с двухгрупповым преобразователем. В общем случае эти мосты могут быть рассчитаны на разную нагрузку. При отказе одного или нескольких мостов, и способности оставшихся поддерживать все режимы генератора отказа СВ не происходит. Если же при этом на режим генератора накладывается ограничение, то наступает частичный отказ СВ. Во всех остальных случаях наступает полный отказ. Обычно повышение надёжности в этом случае достигается выполнением параллельных мостов такими, чтобы

выход из строя любого из них не приводил к отказу СВ. Например в двухгрупповых преобразователях и форсировочную, и рабочую группу изготавливают способными обеспечить длительные режимы генератора.

Для повышения надёжности генератора, а также удобства эксплуатации на станции обычно применяются резервные системы возбуждения. Производители предлагают как тиристорные, так и электромашинные резервные СВ. Следует отметить, что переводы возбуждения с рабочей СВ на резервную и обратно нередко бывают неудачными и приводят к потере возбуждения. Для разработки методики перевода без отказов необходимы дополнительные исследования электромагнитных процессов, протекающих в контурах преобразователей систем возбуждения, включенных на параллельную работу.

### 3. Динамика отказов силовой части и СУВ.

На первоначальном этапе разработки полупроводниковых СВ применением резервирования удалось достичь высоких показателей надёжности силовой части. Поэтому основные усилия разработчиков были направлены на повышение надёжности систем управления возбуждением. И тем не менее до появления микропроцессорного управления возбуждением надёжность цепей управления была существенно ниже, чем у силовой части [6, 7, 11, 12]. Это объяснялось большим количеством элементов в системе управления возбуждением; сложностью систем в эксплуатации и ремонте; наличием скрытых дефектов изготовления.

С переходом на микропроцессорную элементную базу повысились функциональные возможности систем управления возбуждением, в том числе появились возможности самодиагностики. Это значительно снизило время восстановления СВ при частичных отказах. С повышением степени интеграции количество элементов и объём монтажа уменьшился, что существенно снизило вероятность отказов в цепях управления. При этом конструктивные схемы систем микропроцессорного управления стремятся сделать такими, чтобы отказы их элементов являлись только частичными для СВ в целом. Из-за высокой интеграции схем с микропроцессорным управлением их ремонт может быть проведён только специалистами высокого уровня. Поэтому снижается количество отказов вследствие дефектов после ремонта. Следует заметить, что эксплуатация микропроцессорных систем требует меньшего количества персонала, но с высоким уровнем квалификации. При этом у оперативного персонала становится меньше возможностей для неправильных действий, это также позволило снизить количество отказов. С учётом резервирования надёжность СУВ в настоящее время значительно возросла.

В силовой части в последние десятилетия не было качественного скачка, как в случае с СУВ. Элементная база, схемные и конструктивные ре-

шения остались прежние. При это надежность силовой части существенно не изменилась, более того, стремление снизить себестоимость СВ привело к упрощенным решениям, в частности, в ряде случаев к отказу от полноценного резервирования.

#### Выводы

Проведенный анализ статистики, причин и тенденций отказов СВ синхронных генераторов показывает, что надежность СВ сегодня остаётся низкой и во многом определяет надёжность генераторов в целом. При этом до половины всех отказов СВ происходят по организационным причинам, требующим соответствующих мер организационного характера.

Сегодня надёжность СУВ значительно повысилась, поэтому дальнейшее повышение надежности СВ следует ожидать за счёт снижения отказов в силовой части. Однако при этом следует отметить, что при применении 100 %-ного резервирования в преобразовательной части и систем резервного возбуждения для повышения надёжности и удобства эксплуатации необходимо дополнительное исследование электромагнитных процессов при параллельной работой преобразователей в процессе перевода.

#### Литература

1. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
2. Гольдштейн, М.Е. Вентиляльные системы возбуждения синхронных генераторов: учебное пособие / М.Е. Гольдштейн. – 3-е издание, перераб. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.
3. Гайнуллин, Р.Р. Защита синхронных генераторов с тиристорными системами возбуждения от коротких замыканий в цепи ротора: дисс. ... канд. техн. наук / Р.Р. Гайнуллин. – Свердловск, 1989.
4. Обзор и анализ повреждаемости электрооборудования и линий электропередачи в энергосистемах за 1982 год. Выпуск 1. – М.: Союзтехэнерго, 1983.
5. Обзор и анализ повреждаемости электрооборудования и линий электропередачи в энергосистемах за 1988 год. Выпуск 1. – М.: Союзтехэнерго, 1989.
6. Анализ причин технологических нарушений в работе электроустановок за 1995 год. – М.: ОРГРЭС, 1996.
7. Анализ причин технологических нарушений в работе электроустановок за 1998 год. – М.: ОРГРЭС, 1999.
8. Новое оборудование для систем возбуждения и опыт его эксплуатации / В.К. Воробей, С.Л. Иванов, В.В. Кичаев и др. // Электрические станции. – 2002. – № 11. – С. 51–57.
9. Пат. 2197051 Российская Федерация, МПК 7 Н 02 Н 7/12. Способ и устройство защиты тиристорного преобразователя от развивающихся коротких замыканий / А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн. – № 2001109387; заявл. 06.04.2001; опубл. 20.01.2003, Бюл. № 2.
10. Пат. 2282925 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 7/09, Н 02 Р 9/14. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн, Е.Я. Крекер. – № 2005111665; заявл. 19.04.2005; опубл. 27.08.2006, Бюл. № 8.
11. Глебов, И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1988.
12. Костелянец, В.С. Режимы и надёжность работы тиристорного возбудителя синхронной машины / В.С. Костелянец. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию 10.06.2008 г.

**Андреев Алексей Николаевич** – доцент кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, доцент. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

**Andreev Alexei Nikolajevich** – candidate of technical science, associate professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

**Гольдштейн Михаил Ефимович** – заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

**Goldstein Michael Efimovich** – candidate of technical science, Professor, Head of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

**Шаипов Ринат Азатович** – аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Контактный телефон: 8-(351) 267-92-41.

**Shaipov Rinat Azatovich** – postgraduate student of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department, South-Ural State University, Chelyabinsk. Contact phone: 8-(351) 267-92-41.

## ПЕРСПЕКТИВЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ЗА СЧЕТ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов  
г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова*

## METHODS TO INCREASE THE EFFECTIVENESS OF THE ELECTRIC ARC FURNACES BY MEANS OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENTS

*G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev, I.A. Yakimov  
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

На основе системного подхода выделены главные подсистемы комплекса дуговой сталеплавильной печи, определяющие основные технико-экономические показатели – производительность и электромагнитную совместимость; сформулированы основные требования к этим системам и определены возможные перспективы их развития в будущем.

*Ключевые слова:* электродуговая печь (ЭДП), статический компенсатор реактивной мощности, управление электрическим режимом ЭДП, электропечной трансформатор, энергопотребление.

The article gives the results of research work of electric mode control system's parameters influence on energy datum of the super powerful AC-EAF-180 of the OAO "MMK" (open joint stock company "Magnitogorsk iron and steel works").

*Keywords:* electrical arc furnace (EAF), static reactive compensator, control of EAF electrical mode, arc furnace transformer, electrical consumption.

В последние годы наблюдается значительный рост объемов производства электростали. В индустриально развитых европейских странах и Японии эта цифра составляет 35 – 40 %, в США – более 50 %, в России в 2006 г. было выплавлено в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) 21 % от общего производства стали. Примечательно, что в строй действующих введены ДСП ультравысокой мощности, у которых удельная мощность печного трансформатора составляет примерно 1 МВ·А на тонну расплава. Две ДСП из этой серии были запущены в эксплуатацию в 2006 г. на ОАО «ММК»; установленная мощность их печных трансформаторов составляет 150 МВ·А, диапазон изменения вторичного напряжения находится в пределах 800–1400 В.

Дальнейший анализ обсуждаемых вопросов проведем на примере ДСП подобного класса, которые на сегодняшний день являются самыми крупными приемниками электрической энергии с несимметричным и резкопеременным характером изменения нагрузки. Поэтому при эксплуатации столь мощных и высокопроизводительных агрегатов наиболее значимыми и актуальными являются две проблемы:

– обеспечение максимальной производительности агрегата при эффективном использовании подводимой энергии;

– обеспечение условий электромагнитной совместимости мощной нелинейной нагрузки и питающей сети.

В реальных производственных условиях высокая производительность обеспечивается не только за счет введения в печь максимальной электрической мощности – это лишь одно из условий уменьшения времени нахождения печи под током. Большое значение имеет также сокращение времени непроизводительных пауз, которое складывается из запланированных и незапланированных простоев. Последние обусловлены нарушениями организации и технологии производства, логистики, а также отказами оборудования, в том числе и электрического.

С учетом этих факторов следует проводить анализ действующего и выбор перспективного силового электрооборудования ДСП и его систем управления. Решение этих проблем рассмотрим на основе известных положений системного анализа, который, в частности, предусматривает два прин-

ципиальных подхода к изучению объекта: во-первых, как единого целого, в данном случае по отношению к внешней энергосистеме, во-вторых, как совокупности локальных подсистем, обеспечивающих производственный процесс по заданной технологической программе.

В качестве основных выделяют следующие подсистемы, которые можно рассматривать как самостоятельные локальные системы.

1. Система регулирования напряжения (реактивной мощности) на высокой стороне печного трансформатора; ее задачи – стабилизация напряжения и его симметрирование при изменении тока дуг от холостого хода до короткого замыкания, в том числе при несимметричных режимах ДСП, например, при работе на двух дугах. Эти условия с достаточной точностью выполняются при существующей схеме статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ), в составе фильтров ( $\Phi$ ), настроенных на 2-, 3-, 4-ю гармоники, и тиристорно-реакторной группы (ТРГ) – регулируемой индуктивности (рис. 1) [1]. Схема управления ТРГ настроена на поддержание реактивной мощности в узле нагрузки на нулевом уровне:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{ДСП}} - Q_{\Phi} + Q_{\text{ТРГ}} \approx 0.$$

Очевидно, что стабилизация напряжения на шинах 35 кВ способствует более устойчивой и эффективной работе ДСП. Статический компенсатор реактивной мощности является быстродействующим регулятором напряжения, от величины

которого зависит мощность, вводимая в печь. На рис. 2 приведены графики изменения активной мощности с включенной (а) и отключенной (б) системой компенсации реактивной мощности.

Принятая конструкция СКРМ, предложенная более 30 лет назад, имеет существенные недостатки в силовой части и в системе управления. Во-первых, это двойная установленная мощность реактивных элементов – конденсаторов и реакторов (по 180 Мвар). Во-вторых, ТРГ такой высокой мощности, выполненная по шестипульсовой схеме, сама является источником высших гармоник, величина которых соизмерима с гармониками, генерируемыми ДСП. И последнее, – система регулирования не использует все резервы СКРМ и не обеспечивает полной стабилизации напряжения на высокой стороне трансформатора и тем более на электродах печи, поскольку просадки напряжения вызваны не только набросом реактивной мощности  $\Delta Q_{\Sigma}$ , но и активной составляющей  $\Delta P_{\Sigma}$ .

Подчеркнем, что наибольший эффект регулирования может быть достигнут при поддержании напряжения на электродах (точка В, рис. 1).

С учетом того, что эти две точки (А – подключение СКРМ и В – выделение мощности в нагрузке) разнесены друг от друга индуктивностями реактора, печного трансформатора и короткой сети, следует, что полной стабилизации напряжения в точке В добиться затруднительно, поскольку такое регулирование сопровождалось

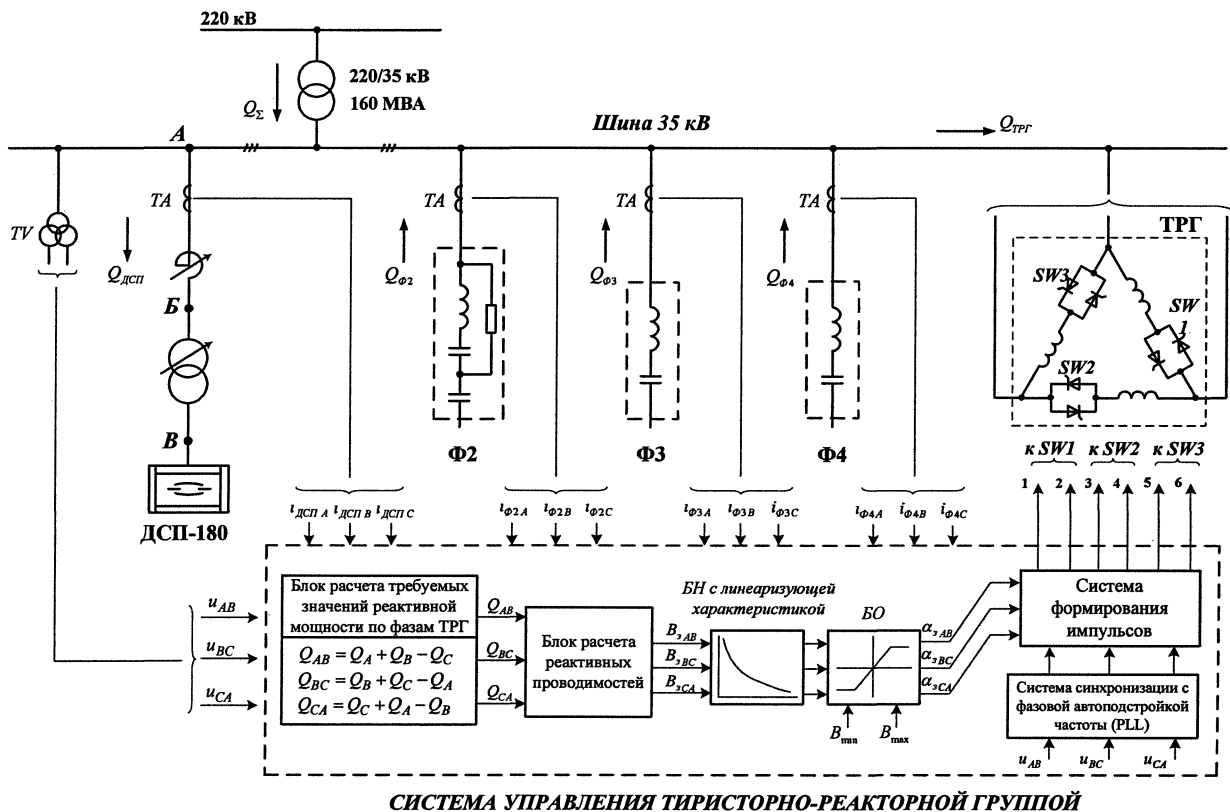
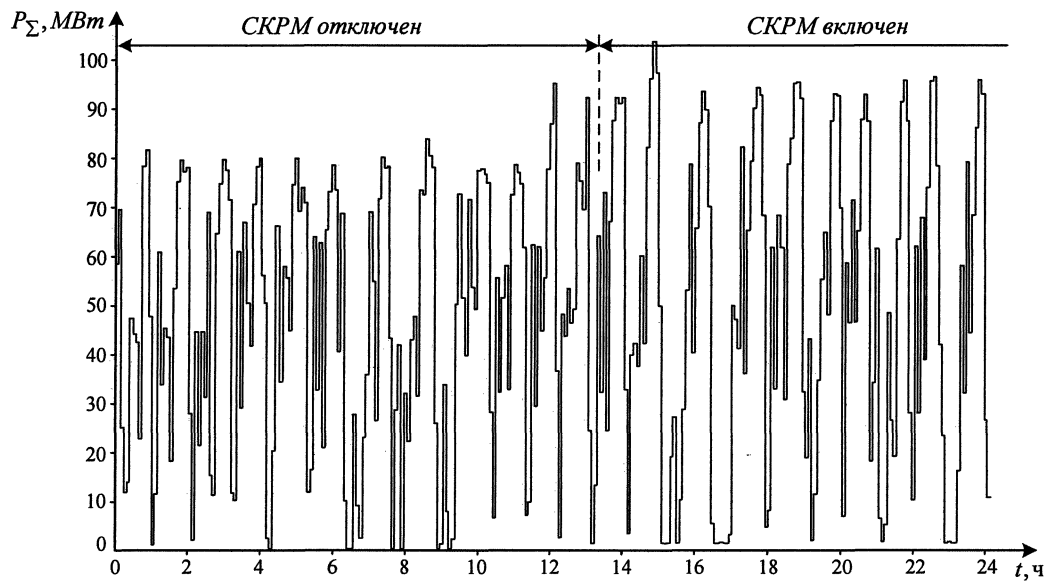
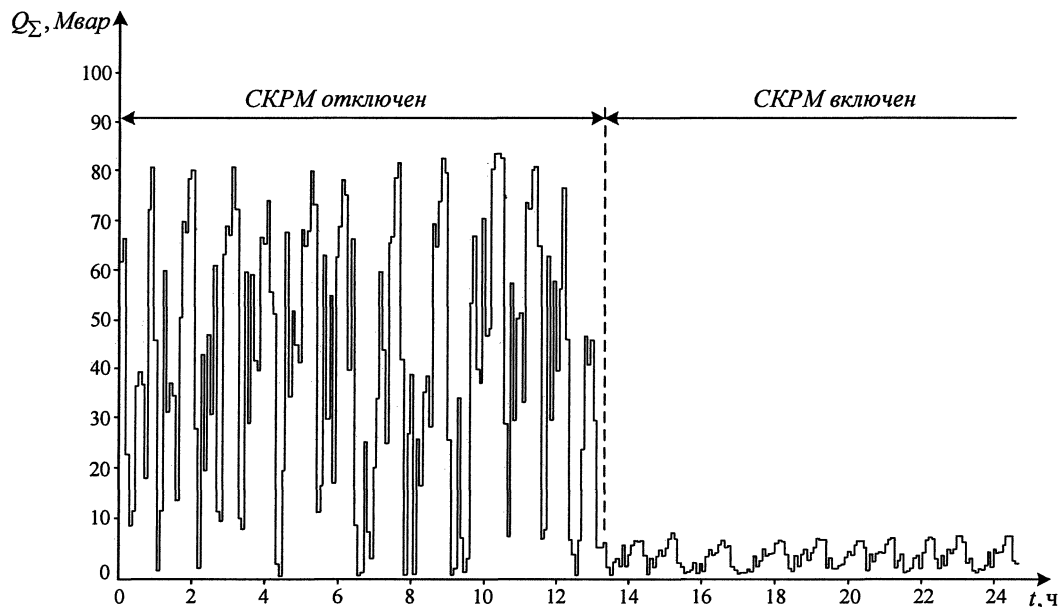


Рис. 1. Функциональная схема системы управления СКРМ



а)



б)

**Рис. 2. Временные диаграммы изменения активной (а) и реактивной (б) мощностей в узле нагрузки ДСП-180**

бы увеличением напряжения в точке А. С другой стороны, в пределах допустимых отклонений напряжения ( $+ 5 \% U_{ном}$ ) такие режимы приемлемы.

Другими словами, представляет интерес исследование электрических характеристик ДСП при повышенном напряжении на высокой стороне печного трансформатора в допустимых пределах за счет генерирования реактивной мощности СКРМ. Диапазон и эффективность такого регулирования существенно возрастут в случае присоединения ТРГ и фильтров за реактором в точке Б, если такая возможность имеется.

Широкое внедрение силовой электроники, в том числе мощных управляемых ключей в виде запираемых тиристоров и полевых транзисторов делает перспективным использование нового класса компенсирующих устройств на базе активных фильтров технологии FACTS [2]. Такие устройства являются более быстродействующими по сравнению с традиционными схемами, функционирующими в настоящее время, и их анализ заслуживает отдельного рассмотрения.

2. Система управления электрическим режимом печи – двухуровневая (рис. 3). Исход-

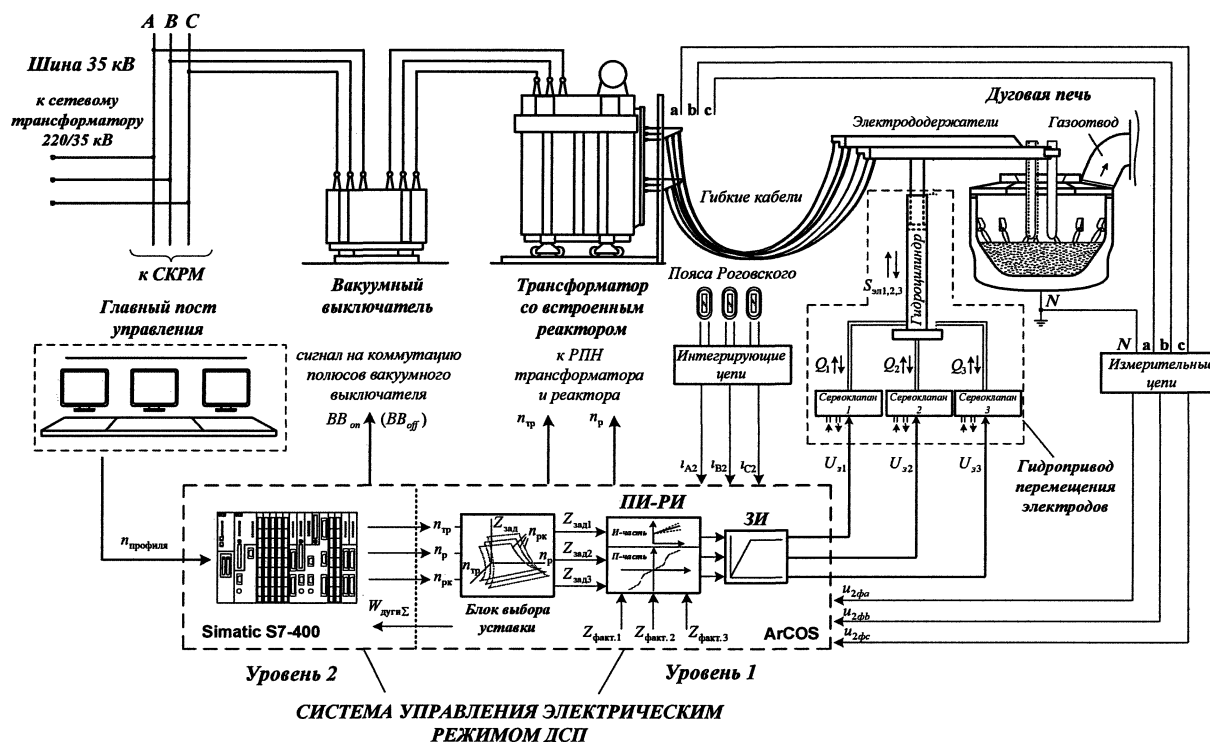


Рис. 3. Функциональная схема системы управления электрическим режимом ДСП-180

ными параметрами для системы управления нижнего уровня являются: ступень трансформатора  $n_{\text{тр}}$ , ступень реактора  $n_{\text{р}}$  и номер рабочей кривой  $n_{\text{рк}}$ . В соответствии со значениями этих параметров система перемещения электродов ArcCOS формирует сигнал задания на рабочий импеданс вторичного контура ДСП  $Z_{\text{зад}}$  или задание на активные сопротивления дуг. Здесь же по мгновенным значениям фазных токов и напряжений рассчитывается фактическое значение полных сопротивлений  $Z_{\text{факт}}$  и сравнивается с заданным. Ошибка устраняется с помощью ПИ-регулятора, выход которого через датчик интенсивности расхода (ЗИ) соединен с двухкаскадным сервоклапаном, осуществляющим регулирование расхода рабочей жидкости в гидроцилиндре привода перемещения электродов.

На втором более высоком уровне происходит идентификация стадий плавки, а по ней – выбор соответствующей рабочей кривой, ступеней трансформатора и реактора, которые формируют задание для системы нижнего уровня. Входными сигналами системы управления являются: номер профиля плавки, определяемый исходным составом шихты, и количество электроэнергии, введенной в печь с начала плавки.

Управление электрическим режимом является многомерной задачей и в современных системах осуществляется в закрытой эвристической форме на основе эмпирических формул, полученных экс-

периментальным путем [3]. Выбор структуры и алгоритмов управления является одной из наиболее сложных и актуальных проблем. Это объясняется следующими причинами: во-первых, сложные физико-химические процессы, протекающие в замкнутом пространстве ДСП, не поддаются точному аналитическому анализу, во-вторых, затруднительно выделить параметры, непосредственно отражающие состояние шихты и шлакового слоя в динамических процессах на относительно малом временном интервале, и, наконец, оптимизация электрического режима на основе адекватной идентификации стадии и процесса плавки является наиболее существенным резервом повышения производительности и сокращения расхода электроэнергии.

На смену «стадийному» управлению, основанному на применении статистических методов определения стадий плавки, приходят новые методы управления с использованием интеллектуальных регуляторов, работающих по классической схеме регулирования на основе принципа обратной связи с обработкой не одной, а нескольких контролируемых величин, например, содержание высших гармоник, температура шихты и расплава и др., а также системы, построенные с использованием виртуальных моделей физико-химических процессов плавки на основе тепло-, массообмена и энергетического баланса [3].

Следующим шагом в развитии систем управления электрическим режимом ДСП долж-

но стать использование динамических моделей электрического контура печи, построенных на базе нейронных сетей [4]. Преимуществом данных систем является возможность непрерывной адаптации к изменяющимся условиям плавки путем использования обучающихся нейроконтроллеров.

3. Исполнительными органами системы управления помимо гидропривода перемещения электродов являются печной трансформатор и реактор. Существующие конструкции контактных переключателей позволяют производить переключение под нагрузкой без снятия напряжения с помощью РПН. Тем не менее подобные операции не могут происходить мгновенно, переход на одну ступень трансформатора занимает примерно 5 с, а полное время перехода с момента зажигания дуги на установившийся режим составляет 30 – 40 с. Во время плавки число таких переходов доходит до 6, а это значит, что 3 – 4 минуты (7 – 10 %) нахождения печи под током

система регулирования практически разомкнута и печь работает в неоптимальном режиме.

Регулирование напряжения и индуктивности реактора в современных конструкциях печных трансформаторов осуществляют в третичной обмотке трансформатора. В этом компромиссном варианте между высоковольтной первичной и сильноточной вторичной обмоткой напряжение в третичной обмотке меньше первичного, а ток – меньше вторичного. Конструкция печных трансформаторов такова, что в одном баке находятся три магнитопровода: основного трансформатора (1), вольтодобавочного трансформатора (2) и реактора (3), а также шесть контактных переключателей (по два на фазу,  $K1$  и  $K2$ ) (рис. 4, а).

Для повышения эффективности ДСП необходимо решить две задачи: сокращение времени переключения и обеспечение надежности работы печного трансформатора. Повышение быстродействия, а также необходимый диапазон регулирования вторичного напряжения могут быть обеспече-

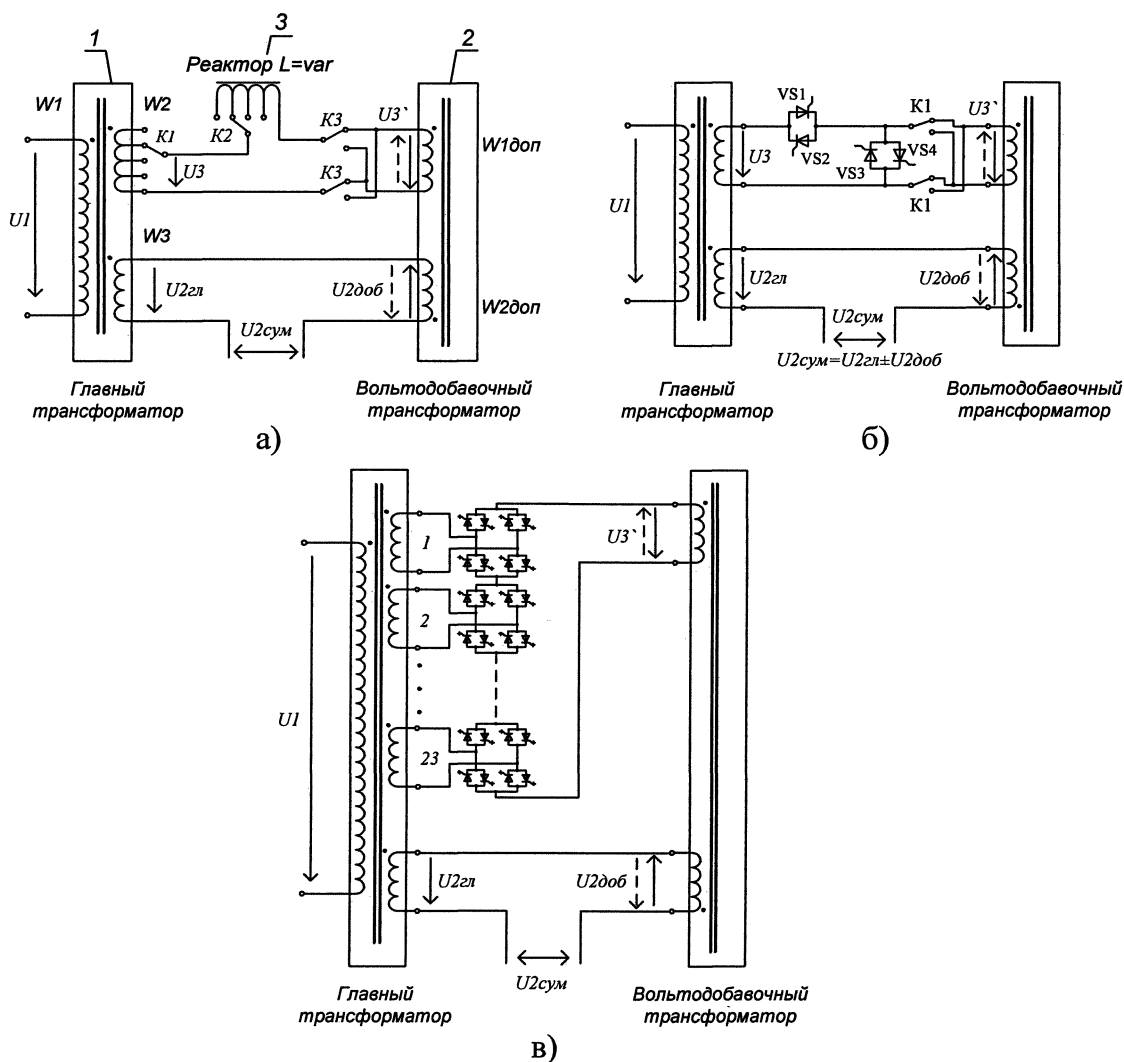


Рис. 4. Схемные решения регулирования напряжения печного трансформатора: а – существующий вариант с использованием РПН; б – с использованием последовательно-параллельных тиристорных ключей; в – дискретное регулирование с применением запираемых тиристоров



Состояние и перспективы развития электрооборудования ДСП

Подсистемы ДСП	Основные требования	Исполнение на современном уровне	Основные недостатки	Перспективное исполнение	Ожидаемый эффект
Система регулирования напряжения (реактивной мощности)	Стабилизация и симметрирование напряжения, фильтрация высших гармоник тока	Конденсаторные батареи в составе фильтров и ТРГ	Большая установленная мощность, высокие потери, недостаточное быстродействие	Активные фильтры типа СТАТКОМ на базе технологии FACTS	Снижение расхода электроэнергии, улучшение электромагнитной совместимости ДСП и питающей сети
Система управления электрическим режимом	Рациональный выбор вторичного напряжения, сопротивление реактора и тока дуг	Двухуровневая стадийная система с контролем удельного расхода электроэнергии	Отсутствие прямой достоверной информации о ходе плавки	Регуляторы на основе нейронных сетей с самообучением	Снижение расхода электроэнергии, повышение производительности
Печной трансформатор с реактором	Высокое быстродействие и надежность	Контактные переключатели РПН числа витков в третичной обмотке	Ограниченный ресурс и недостаточное быстродействие РПН	Бесконтактное регулирование с помощью полупроводниковых элементов	Повышение производительности ДСП, увеличение надежности за счет исключения контактных РПН

ны в схемах с бесконтактным регулированием в третичной обмотке на основе однооперационных тиристоров (рис. 4, б) или запираемых ключей (рис. 4, в) [5].

Сложная конструкция печного трансформатора делает актуальным вопрос сокращения, а в идеале – устранения аварийных отключений, поскольку при многократном срабатывании защит возникает необходимость слива масла для визуального осмотра активных и токоведущих частей, что напрямую связано, как уже ранее отмечалось, с потерей производительности. В этой связи возникают новые требования к системе управления электрическим режимом, в частности, по контролю токов короткого замыкания по фазам и высокого напряжения, а также температуры масла в баке печного трансформатора и температуры окружающей среды. В конечном счете, это сводится к созданию многофункциональной интеллектуальной системы защит, предупреждающей появление опасных перегрузок и перенапряжений в элементах печного трансформатора.

Подводя итог анализа систем электрооборудования ДСП, дадим их краткую характеристику на сегодняшний день и в перспективе (см. таблицу).

#### Выводы

1. В статье на основе системного подхода рассмотрены проблемы электрических режимов ДСП, с одной стороны, как целостной системы по отношению к питающей сети, а с другой – как

совокупности локальных подсистем (компенсатор реактивной мощности, система управления, печной трансформатор), эффективность которых может быть повышена за счет использования новых алгоритмов в системе управления и схемных решений в силовой части электротехнического комплекса.

2. Показано, что система компенсации реактивной мощности существенно улучшает технико-экономические показатели ДСП и способствует повышению ее производительности за счет стабилизации напряжения в узле нагрузки.

#### Литература

1. Kornilov, G.P. *Experimental Investigation of Dependence of Power Quality from the Operation Mode of the Ultra High-Power Electric Arc Furnace* / G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev, T.R. Khramshin, A.N. Shemetov // *Compatibility in Power Electronics (CPE '07)*. – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentCon.jsp?punumber=4296484>. – P. 1–4.
2. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* / N.G. Hingorani, L. Gyugyi – IEEE Press book, 2000. – 432.
3. Линнингер, А.А. *Современное технологическое и информационное управление на примере конструирования дуговой электропечи* / А.А. Линнингер, А.А. Патуцци // *Чёрные металлы*. – 1995. – № 3. – С. 23–32.

4. Латшин, И.В. Автоматизация дуговых печей / И.В. Латшин. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 167 с.
5. Способы управления электрическим ре-

жимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 76–81.

*Поступила в редакцию 15.02.2008 г.*

**Корнилов Геннадий Петрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова (e-mail: Korn\_mgn@mail.ru).

**Kornilov Gennady Petrovich** – candidate of engineering science, associate professor of the Electrical Engineering and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (e-mail: Korn\_mgn@mail.ru).

**Николаев Александр Аркадьевич** – аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова (e-mail: alexniko@inbox.ru).

**Nikolaev Alexander Arkadievich** – post-graduate student of the Electrical Engineering and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (e-mail: alexniko@inbox.ru).

**Якимов Иван Александрович** – аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова (e-mail: yakimov\_ivan@mail.ru)

**Yakimov Ivan Alexandrovich** – post-graduate student of the Electrical Engineering and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (e-mail: yakimov\_ivan@mail.ru).

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

*С.В. Панферов, А.И. Телегин  
г. Миасс, филиал ЮУрГУ*

## QUALITY ESTIMATION OF THE CHOICE AND ADJUSTMENT OF AUTOMATIC REGULATOR OF LEVEL OF THE LIQUID

*S.V. Panferov, A.I. Telegin  
Branch of SEI HPE «SUSU» in Miass*

Рассматривается задача структурно-параметрического синтеза системы автоматического регулирования уровня жидкости. Приводится структура и параметры настройки квазиоптимального регулятора. Анализируются устойчивость системы и качество переходных процессов в ней.

*Ключевые слова: автоматический регулятор, уровень жидкости, структура, параметры настройки, устойчивость, качество переходных процессов.*

The problem of structurally-parametrical synthesis of system of automatic control of level of a liquid is considered. The structure and adjustment parameters of a regulator are given. Stability of system and quality of transients in it are analyzed.

*Keywords: automatic regulator, liquid level, structure, adjustment parameters, stability, quality of transients.*

**Введение.** В настоящее время в системах теплоснабжения для автоматического регулирования различных переменных технологических процессов широко используются ПИД-регуляторы и их частные варианты. Накоплен огромный опыт применения таких регуляторов, в частности, разработаны и апробированы различные способы их настройки. Вместе с тем, как неоднократно отмечает В.Я. Ротач в своем сравнительно недавно изданном учебнике [1], алгоритмы П-, ПИ- и ПИД-регуляторов «...были получены чисто эвристическим путем» [1, с. 82] и что «... достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения ... до сих пор получить не удалось» [1, с. 24]. Поэтому представляют интерес всякие попытки найти такое обоснование для ПИД-регуляторов.

**1. Постановка задачи.** В работах [2, 3], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности применения ПИД-регуляторов, здесь задача решалась методом «подгонки» передаточной функции замкнутой системы к некоторому достаточно разумному и практически достижимому виду. Найдены эталонные структуры и настройки регуляторов для типовых динамических характеристик промышленных объектов управления, при этом установле-

но, что все эти регуляторы принадлежат ПИД-семейству. Казалось бы, что поставленная цель достигнута, однако для полноты исследования проблемы необходимо рассмотреть вопрос о качестве переходных процессов в таких системах и о грубости этих структур и настроек. Данная задача и решается в настоящей работе для объектов регулирования уровня жидкости, т.е. для объектов управления с передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{1}{T_{об}p} \exp(-\tau_{об}p), \quad (1)$$

где  $T_{об}$ ,  $\tau_{об}$  – соответственно постоянная времени и время запаздывания объекта,  $p$  – комплексная переменная. Такими передаточными функциями описываются различные объекты регулирования уровня жидкостей в системах теплоснабжения: конденсаторы, деаэраторы, расширительные баки, выполняющие роль гидростатических стабилизаторов давления в заданных точках тепловой сети, и др.

При этом заметим, что согласно данным работ [2, 3], близким к идеальному для такого объекта является П-регулятор с коэффициентом передачи

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$ , где  $\theta$  – достаточно малая постоянная времени.

**2. Процедура решения задачи.** Для анализа переходных процессов в системе с объектом управления данного типа разработаны две компьютерные программы: одна – для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая – при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод  $T_{об}$ ,  $\tau_{об}$  и коэффициента передачи П-регулятора, каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ , а также вычисляет значения следующих критериев:

$$I_1 = \int_0^{t_K} |\varepsilon(t)| dt, \quad (2)$$

$$I_2 = \int_0^{t_K} \varepsilon^2(t) dt, \quad (3)$$

где  $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$  – ошибка регулирования (расхождение),  $x^3(t)$  и  $x(t)$  – соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины,  $t$  – время,  $t_K$  – конечное время оценки переходного процесса. Здесь время регулирования  $t_p$  определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5 %.

**3. Качество переходных процессов при возмущении по заданию.** В процессе вычислений установлено, что во всех случаях, когда  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$

(параметр  $\theta$  полагается равным нулю) дифференциальное уравнение замкнутой системы автоматического регулирования (САР) будет иметь вид

$$\tau_{об} \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об}) = x^3(t - \tau_{об}). \quad (4)$$

Решая уравнение (4) для единичного ступенчатого воздействия, нашли, что во всех этих случаях  $\sigma \cong 49\%$ . Если численное значение  $k_p$  отличается от величины  $\frac{T_{об}}{\tau_{об}}$  ( $\theta \neq 0$ ), то изменяется и

величина перерегулирования. Полученные значения показателей качества переходного процесса, например, для случая, когда  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с, а  $k_p$  принимает различные значения в окрестности

точки  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$  приведены в табл. 1.

Если принять, что  $T_{об} = 30$  с,  $\tau_{об} = 10$  с, то эталонная (базовая) настройка регулятора будет такой же, что и в предыдущем случае, а именно  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ , показатели же качества переходного

процесса будут следующими (табл. 2).

Если  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 3$  с, то эталонная настройка регулятора  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 5$ , показатели качества переходного процесса приведены в табл. 3.

Анализируя данные табл. 1, 2 и 3, можно отметить следующее: при эталонном (базовом) значении коэффициента передачи П-регулятора

Таблица 1

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с при возмущении по заданию

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\sigma, \%$	0	0	3,43	9,30	16,3	31,79	49	64,4	80,7
$t_p, \text{с}$	79	32,4	17	25,4	24,8	33,2	42,2	69,8	99,8
$I_1, \text{ед. рег. вел.} \times \text{с}$	29,47	14,99	10,71	10,32	10,40	11,47	13,79	18,16	26,99
$I_2, \text{ед. рег. вел.}^2 \times \text{с}$	88,34	52,30	41,67	39,27	37,97	37,88	41,09	49,38	70,36

Таблица 2

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 30$  с,  $\tau_{об} = 10$  с при возмущении по заданию

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед. рег. вел.}}$	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\sigma, \%$	0	0	3,73	9,77	16,92	32,60	49	65,5	82,0
$t_p, \text{с}$	158	64,4	33,8	51,6	50,0	67	85	142	200
$I_1, \text{ед. рег. вел.} \times \text{с}$	58,96	29,99	21,55	20,84	21,06	23,35	28,25	37,52	56,51
$I_2, \text{ед. рег. вел.}^2 \times \text{с}$	176,9	104,9	83,81	79,08	76,56	76,69	83,66	101,5	147,9

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$  перерегулирование  $\sigma$  в рассматриваемых САР при различных значениях  $T_{об}, \tau_{об}$  получается практически одинаковым,  $\sigma \approx 47 - 49 \%$ . Время регулирования при прочих равных условиях растет прямо пропорционально росту  $(T_{об} + \tau_{об})$  и обратно пропорционально величине  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ .

Базовая настройка П-регулятора  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$  является достаточно грубой (робастной), поскольку существует заметная окрестность точки  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$ , в

которой сохраняются приемлемое качество и запас устойчивости системы (заметим, что о запасе устойчивости можно судить непосредственно по семейству кривых переходного процесса, полученных при различных настройках регулятора). Из таблиц также видно, что настройки П-регулятора, оптимальные по критериям (2) и (3), не совпадают как между собой, так и каждая с базовой настройкой. Так, например, по табл. 1 базовое значение коэффициента передачи  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ , вместе с тем

оптимальное по минимуму критерия  $I_1$  значение  $k_p = 1,75$ , а оптимальное по минимуму критерия  $I_2$  значение  $k_p = 2,5$ . Причем настройки, найденные из условия минимума критерия  $I_2$  заметно ближе к базовой настройке, в некоторых случаях их различие можно считать достаточно малым.

Очевидно, что все это объясняется как существом рассматриваемого метода синтеза САР, так и определенной погрешностью при его реализации.

**4. Качество переходных процессов при возмущении по нагрузке.** Показатели качества переходных процессов в САР при возмущении по нагрузке (со стороны регулирующего органа), например, для случая, представленного в табл.1, приведены в табл. 4.

Анализ полученных результатов показал, что величина перерегулирования  $\sigma$  при одинаковых настройках регулятора остается практически одной и той же как при возмущении по заданию, так и при возмущении со стороны регулирующего органа, несмотря на то, что  $\sigma$  в этих случаях вычисляется вообще-то по-разному [4, 5]. Кроме того, координаты точек минимума функций  $I_1 = f_1(k_p)$  и  $I_2 = f_2(k_p)$ , вычисленных для случая возмущения по нагрузке, также совпадают с аналогичными координатами в случае возмущения по заданию. По-видимому, данные обстоятельства подтверждают известное высказывание о том, что если САР оптимизирована для отработки возмущений по заданию, то одновременно достигается оптимум и при отработке возмущений по нагрузке [6].

Время регулирования  $t_p$  при прочих равных условиях при возмущении со стороны регулирующего органа меньше, чем в случае возмущения по заданию, что, в общем, достаточно объяснимо.

**5. Устойчивость САР.** Если робастность рассматривать как грубость системы по отношению к изменениям параметров объекта управления, то можно привести следующие результаты с учетом

Таблица 3

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 3$  с при возмущении по заданию

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед.рег.вел.}}$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
$\sigma, \%$	3,03	9,98	18,45	27,59	37,06	46,66	56,4	66,08	75,76
$t_p, \text{с}$	10,2	15	14,6	19,6	19,4	25	30,6	41,6	58,2
$I_1, \text{ед.рег.вел.} \times \text{с}$	6,37	6,10	6,20	6,56	7,14	8,02	9,31	11,26	14,43
$I_2, \text{ед.рег.вел.}^2 \times \text{с}$	24,82	23,14	22,35	22,26	22,81	24,09	26,32	30,04	36,51

Таблица 4

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с при возмущении по нагрузке

$k_p, \frac{\% \text{ хода ИМ}}{\text{ед.рег.вел.}}$	0,5	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\sigma, \%$	0	0	3,43	9,30	16,3	31,79	47,9	64,4	80,7
$t_p, \text{с}$	17,6	13,6	12,4	12,0	11,8	11,4	11,2	11,0	19,8
$I_1, \text{ед.рег.вел.} \times \text{с}$	0,391	0,199	0,143	0,137	0,138	0,153	0,184	0,241	0,354
$I_2 \times 10^2, \text{ед.рег.вел.}^2 \times \text{с}$	1,570	0,929	0,741	0,698	0,675	0,673	0,731	0,877	1,248

того, что все вышеизложенное можно интерпретировать и как анализ для данного случая. При этом нужно только считать, что регулятор настроен по параметрам объекта управления, имевшим место в недалеком прошлом, а в данный момент времени объект управления имеет те значения параметров, которые указаны в заголовках табл. 1, 2 и 3.

Если постоянная времени и время запаздывания объекта изменятся соответственно на  $\Delta T_{об}$  и на  $\Delta \tau_{об}$ , а регулятор будет иметь настройку, найденную по предыдущим значениям его параметров

$k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$ , то передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

$$W_{pc}(p) = \frac{\exp(-\tau_{об} p) \cdot \exp(-\Delta \tau_{об} p)}{(\theta + \tau_{об})p (1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$$

Используя критерий устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием [7], нашли, что в этом случае критическая частота  $\omega_{кр} = \frac{1}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})}$ , по-

этому условие устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования (САР) в общем случае запишется так:

$$(\tau_{об} + \Delta \tau_{об}) / [(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})] < \pi / 2. \quad (5)$$

На координатной плоскости  $\Delta T_{об} / T_{об}$ ,  $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$  граница области устойчивости будет представляться следующей прямой (см. рисунок):

$$\frac{\Delta \tau_{об}}{\tau_{об}} = \frac{\pi(\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} \left(1 + \frac{\Delta T_{об}}{T_{об}}\right) - 1. \quad (6)$$

На рисунке область устойчивости – это область, расположенная правее своей границы

(штриховка направлена внутрь области). Причем нетрудно видеть, что с увеличением параметра  $\theta$  область устойчивости замкнутой САР расширяется, так как  $(\frac{\pi(\tau_{об} + \theta)}{2\tau_{об}} - 1)$  – точка пересечения

прямой с осью ординат  $\Delta \tau_{об} / \tau_{об}$  с увеличением  $\theta$  ползет вверх, а  $(\frac{2\tau_{об} - \pi\tau_{об} - \pi\theta}{\pi(\tau_{об} + \theta)})$  – точка

пересечения прямой (6) с осью абсцисс  $\Delta T_{об} / T_{об}$  перемещается влево. При  $\theta = 0$  область устойчивости будет иметь наименьший размер, однако при этом начало координат будет располагаться все-таки правее ее границы. Следовательно, при  $\theta = 0$

САР имеет некоторый запас устойчивости относительно вариаций параметров  $\Delta \tau_{об}$  и  $\Delta T_{об}$ , с увеличением  $\theta$  область устойчивости [8] расширяется.

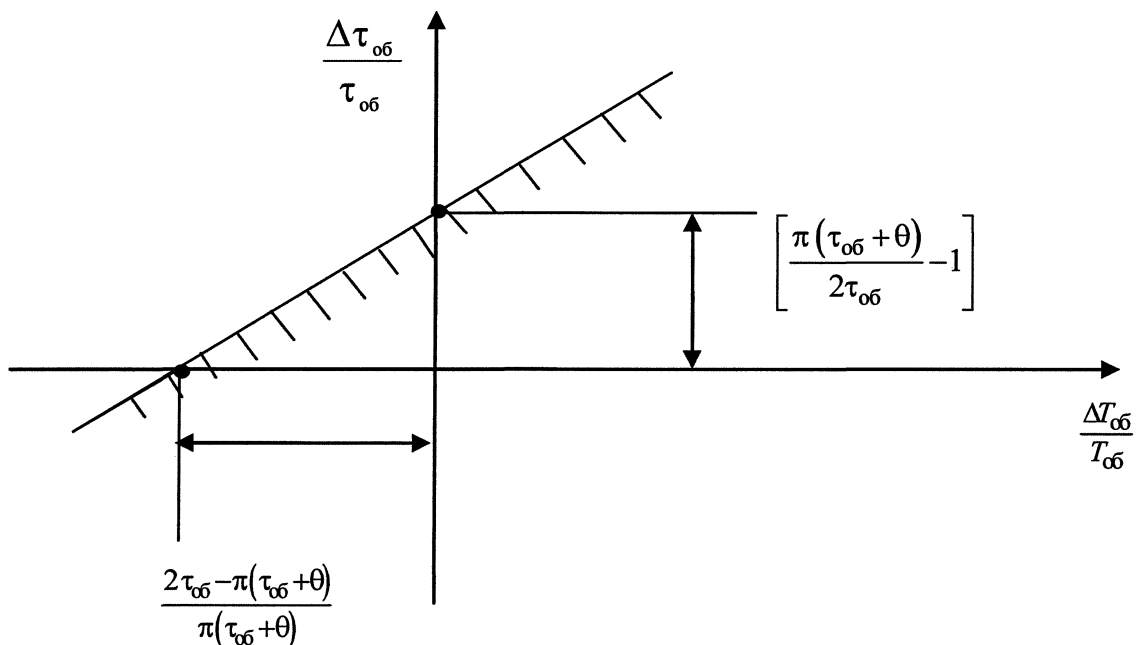
Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию

$$W_{зс}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об})p + \exp[-(\tau_{об} + \Delta \tau_{об})p]}$$

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение САР будет иметь вид

$$(\theta + \tau_{об})(1 + \Delta T_{об} / T_{об}) \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}) = U(t - \tau_{об} - \Delta \tau_{об}), \quad (7)$$

где  $x$  – выходная (регулируемая) величина объекта,  $U$  – заданное значение регулируемой величины. Из (5) и из решения дифференциального уравнения (7) следует, что при  $\Delta T_{об} > 0$  влияние этого



Область устойчивости САР

параметра на устойчивость (робастность устойчивости) и качество (робастность качества) САР аналогично влиянию параметра  $\theta$  [2, 3], т.е. колебательность переходной функции уменьшается с ростом  $\Delta T_{об}$ , переходный процесс все в большей степени приобретает аperiodический характер. Для примера в табл. 5 приведены показатели качества переходных процессов в САР для случая, когда  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с,  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ ,  $\Delta\tau_{об} = 0$ , а

$\Delta T_{об}$  принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Аналогичные результаты получаются и при  $\Delta\tau_{об} < 0$ , т.е. с увеличением  $|\Delta\tau_{об}|$  демпфированность системы растет. Если же  $\Delta\tau_{об} > 0$ , то с увеличением  $\Delta\tau_{об}$  перерегулирование возрастает, ухудшаются как качество переходного процесса, так и запас устойчивости системы. В табл. 6 приведены показатели качества переходных процессов (ПП) в САР для случая, когда  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с,  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = 3$ ,  $\Delta T_{об} = 0$ , а

$\Delta\tau_{об}$  принимает различные как положительные, так и отрицательные значения.

Выполненные расчеты показали, что если параметры объекта управления определены точно, то при  $\theta = 0$  с перерегулирование в данной САР  $\sigma \approx 49\%$ . Если же время запаздывания модели объекта управления  $\tau_{об}$  (эта величина используется при вычислении настройки регулятора  $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$ ) меньше времени запаздывания,

имеющего место на реальном объекте ( $\tau_{об} + \Delta\tau_{об}$ ), то перерегулирование возрастает. Так, например, если  $\tau_{об} = 4$  с, а  $\Delta\tau_{об} = 1$  с, то  $\sigma = 72\%$ . САР в

такой ситуации, когда из-за погрешности параметрической идентификации получилось, что  $\tau_{об} < (\tau_{об} + \Delta\tau_{об})$ , может и потерять устойчивость. В самом деле, если структура математической модели объекта и все ее параметры, кроме времени запаздывания, определены достаточно точно, то передаточная функция разомкнутой системы  $W_{pc}(p) = \frac{\exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})p}$ , поэтому САР будет

устойчива лишь при выполнении следующего неравенства:  $(\tau_{об} + \Delta\tau_{об}) / (\theta + \tau_{об}) < \pi/2$ . При  $\Delta\tau_{об} = 3$  с получили расходящийся переходный процесс, т.е. система потеряла устойчивость, что и следовало ожидать, так как  $(\tau_{об} + \Delta\tau_{об}) / (\theta + \tau_{об}) = (5 + 3) / 5 > \pi/2$  (табл. 6).

При отработке единичного ступенчатого задания  $U(t) = 1(t)$  при  $t \rightarrow \infty$   $x \rightarrow 1$ , т.е. САР астатическая по задающему воздействию. Передаточная функция системы по каналу «возмущение со стороны регулирующего органа – ошибка регулирования»  $W_{sc}^{po}(p) = \frac{(\tau_{об} + \theta) \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}{(\theta + \tau_{об})(T_{об} + \Delta T_{об})p + T_{об} \exp[-(\tau_{об} + \Delta\tau_{об})p]}$ ,

поэтому  $\lim_{p \rightarrow 0} W_{sc}^{po}(p) = \frac{\tau_{об} + \theta}{T_{об}}$  при  $p \rightarrow 0$ , следова-

тельно, по данному каналу САР статическая, причем ошибка регулирования тем меньше, чем больше коэффициент передачи П-регулятора

$$k_p = \frac{T_{об}}{\tau + \theta}.$$

### Выводы

Как следует из вышеизложенного, рассматриваемый метод построения САР уровня жидкости выгодно отличается от других подходов к решению задачи однозначностью и достаточной про-

Таблица 5

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с при возмущении по заданию при различных значениях  $\Delta T_{об}$

$\Delta T_{об}, c$	+1	+3	+5	-1	-3	-5
$\sigma, \%$	41,89	31,79	23,89	55,02	72,49	97,04
$t_p, c$	42	33,2	32,2	51,6	88,6	157

Таблица 6

Показатели качества переходных процессов для  $T_{об} = 15$  с,  $\tau_{об} = 5$  с при возмущении по заданию при различных значениях  $\Delta\tau_{об}$

$\Delta\tau_{об}, c$	+1	+2	+3	-1	-2	-3
$\sigma, \%$	67,99	87,99	Расходящийся ПП	28,22	9,98	0,0005
$t_p, c$	85	195,6	Расходящийся ПП	26,4	15	9,8

стойкой. В результате синтеза получается устойчивая система с приемлемыми свойствами по робастности.

### *Литература*

1. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.
2. Панферов, В.И. Об одном подходе к решению задачи выбора и настройки автоматических регуляторов / В.И. Панферов // Известия Челябинского научного центра. – 2004. – Вып. 4 (26). – С. 139–144.
3. Панферов, В.И. Выбор и настройки автоматических регуляторов в системах теплоснабжения / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2005. – Вып. 3. – № 13 (53). – С. 81–84.
4. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.П. Копелович. – М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.
5. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шатировский; под ред. Г.М. Глинкова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
6. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер; пер. с нем. – М.: Энергия, 1973. – 190 с.
7. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления / А.А. Воронов // Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем: сб. науч. тр. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
8. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

*Поступила в редакцию 03.11.2008 г.*

**Панферов Сергей Владимирович** – аспирант кафедры «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование процессов в сложных системах управления. Контактный телефон: 8-(351) 267-91-44.

**Panferov Sergey Vladimirovich** – post-graduate student of the Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miassky branch of SUSU. Scientific interests: simulation of processes in difficult control systems. Contact phone: 8-(351) 267-91-44.

**Телегин Александр Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления и математическое моделирование» Миасского филиала ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование процессов в системах управления механическими и энергетическими объектами. Контактный телефон: 8-(3513) 53-22-61.

**Telegin alexander Ivanovich** – Dr. a fiz.-floor-mat. Sciences, the professor managing Control Systems and Mathematical Simulation department of the Miassky branch of SUSU. Scientific interests: simulation of processes in control systems of mechanical and power objects. Contact phone: 8-(3513) 53-22-61.



# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 62 - 83:681.51(075.8)

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО РЕВЕРСИВНОГО ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Л.И. Цытович, А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## THE DECISION OF THE TASK OF STRUCTURAL IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF HEATING INSTALLATION

L.I. Tsitovich, A.V. Kachalov, M.M. Dudkin, R.M. Rakhmatulin  
Chelyabinsk, SUSU

Рассмотрен принцип построения адаптивного к нестабильности напряжения сети канала синхронизации тиристорного преобразователя. Приведены результаты его моделирования в пакете MatLab + Simulink и дана оценка характеристик адаптивного и традиционных принципов синхронизации.

*Ключевые слова:* тиристорный преобразователь, системы управления, устройство синхронизации, адаптация.

The article considers the aufbau principle of thyristor-based converter's synchronizing channel adaptive to line voltage instability. The results of its simulation the in Matlab + Simulink system are given, characteristics of adaptive and traditional principles of synchronisation are estimated.

*Keywords:* thyristor-based converter, control systems, synchronisation device, adaptation.

Современные энергосистемы как стационарного, так и автономного базирования характеризуются высоким уровнем искажений с трудно предсказуемыми параметрами, зачастую выходящими за допустимые нормы искажений и играющими роль дестабилизирующих факторов в работе не только тиристорных преобразователей (ТП), но и технологических установок в целом. Поэтому создание систем управления ТП, способных адаптироваться к изменяющимся параметрам сети, является актуальной задачей, направленной на повышение надежности работы всего комплекса электротехнического оборудования промышленных предприятий.

В синхронных системах управления ТП (рис. 1) [1], характеризующихся наиболее высоким быстродействием, каждый из каналов систем импульсно-фазового управления (СИФУ) синхронизирован с соответствующей фазой А, В, С напряжения сети через устройства синхронизации УС-А, УС-В, УС-С, которые формируют сигналы логической «1» на интервале времени, где соответствующий тиристор блока силовых вентилей (БСВ) может быть переведен в открытое состояние.

Для этих целей зачастую используются схемы регенеративных компараторов (рис. 2, а) [2] на основе линейного звена ЛЗ с высоким значением собственного коэффициента усиления и резистивными звеньями  $K_{ВХ}$ ,  $K_{ОС}$  на входе и в цепи положительной обратной связи. Ширина петли гистерезиса УС (рис. 2, б) определяется соотношением резисторов R1, R2 (рис. 2, в) и амплитудой  $\pm A$  выходных импульсов (ЛЗ) (напряжением источника электропитания, в качестве которого традиционно используется стабилизатор напряжения (СН).

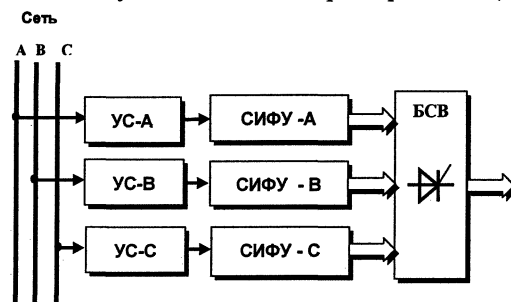


Рис. 1. Функциональная схема синхронной системы управления ТП

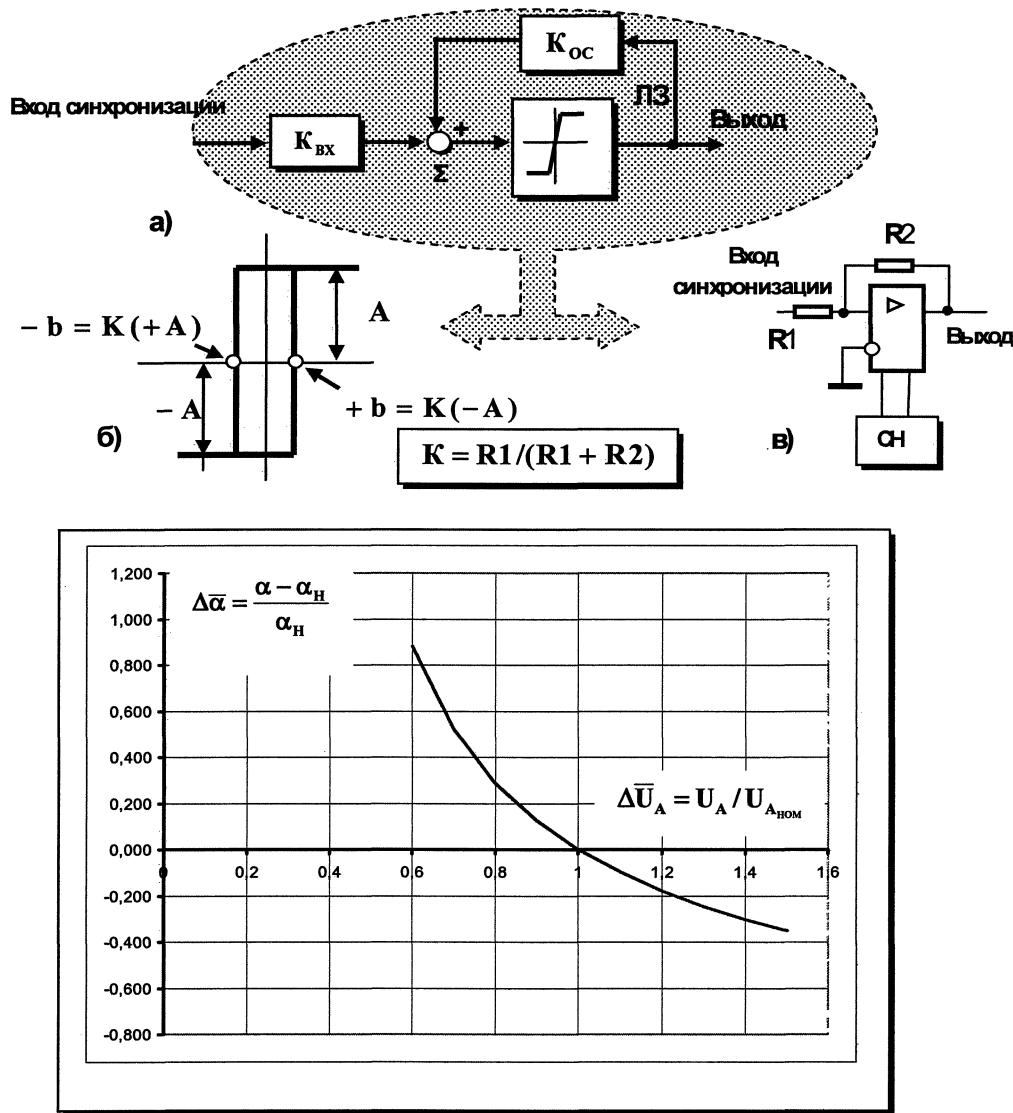


Рис. 2. Обобщенная структурная схема (а), характеристика «вход-выход» (б), пример технической реализации (в) и график погрешности (г) компараторного устройства синхронизации с независимым уровнем фиксации

Ширина петли гистерезиса УС  $\pm b$  (см. рис. 2, б) настраивается таким образом, чтобы передний и задний фронты импульса синхронизации совпадали с точками естественной коммутации, в пределах которых разрешается работа соответствующих клапанов БСВ (см. рис. 1).

На рис. 2, г приведен график зависимости  $\Delta\bar{\alpha} = f(\Delta\bar{U}_A)$ , полученный в результате моделирования процессов в синхронном реверсивном мостовом тиристорном преобразователе (см. рис. 1) в среде MatLab + Simulink при нестабильности напряжения сети. Здесь:  $\Delta\bar{\alpha} = (\alpha - \alpha_H) / \alpha_H$  – нормированная ошибка угла синхронизации  $\alpha$  при его начальном заданном значении  $\alpha_H = 30$  эл. град;  $\Delta\bar{U}_A = U_A / U_{Aном}$  – относительная нестабильность

амплитуды  $U_A$  напряжения сети при ее номинальном значении  $U_{Aном}$ .

Для этих целей зачастую используются схемы регенеративных компараторов (рис. 2, а) [2] на основе линейного звена ЛЗ с высоким значением собственного коэффициента усиления и резистивными звеньями  $K_{вх}$ ,  $K_{ос}$  на входе и в цепи положительной обратной связи. Ширина петли гистерезиса УС (см. рис. 2, б) определяется соотношением резисторов  $R1$ ,  $R2$  (см. рис. 2, в) и амплитудой  $\pm A$  выходных импульсов ЛЗ (напряжением источника электропитания, в качестве которого традиционно используется стабилизатор напряжения СН).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение компараторных УС с постоянным уровнем фиксации синхронизирующего сигнала затруднительно в энергосистемах с неста-

ционной амплитудой напряжения сети. Так, при отклонениях напряжения фазы А (рис. 2, г) в пределах  $\pm 10\%$  ошибка  $\Delta\bar{\alpha}$  начального угла синхронизации также будет находиться в области  $\pm 10\%$ , что приведет к значительным искажениям характеристик ТП.

Частично проблемы ТП, связанные с нестабильностью амплитуды сети, могут быть решены путем использования адаптивного компараторного УС (рис. 3, а) [3], которое отличается от традиционной схемы (см. рис. 2, а) наличием демодулятора ДМ  $n$ -фазной системы синхронизирующих сигналов  $X_{C1}, X_{C2}, \dots, X_{Cn}$ , амплитудного модулятора

АМ и сглаживающего фильтра  $\Phi$ , например первого порядка.

Наличие последнего в структуре УС необходимо только в случае  $n=1$ . В результате характеристика «вход-выход» УС (рис. 3, б) оказывается нестационарной во времени и изменяется в зависимости от параметров системы синхронизирующих воздействий. На практике подобная структура УС может быть реализована, например, на операционном усилителе с питанием от нестабилизированного выпрямленного напряжения с выхода трехфазного «нулевого» выпрямителя (рис. 3, в). Рассмотрим подробнее режимы работы подобного устройства.

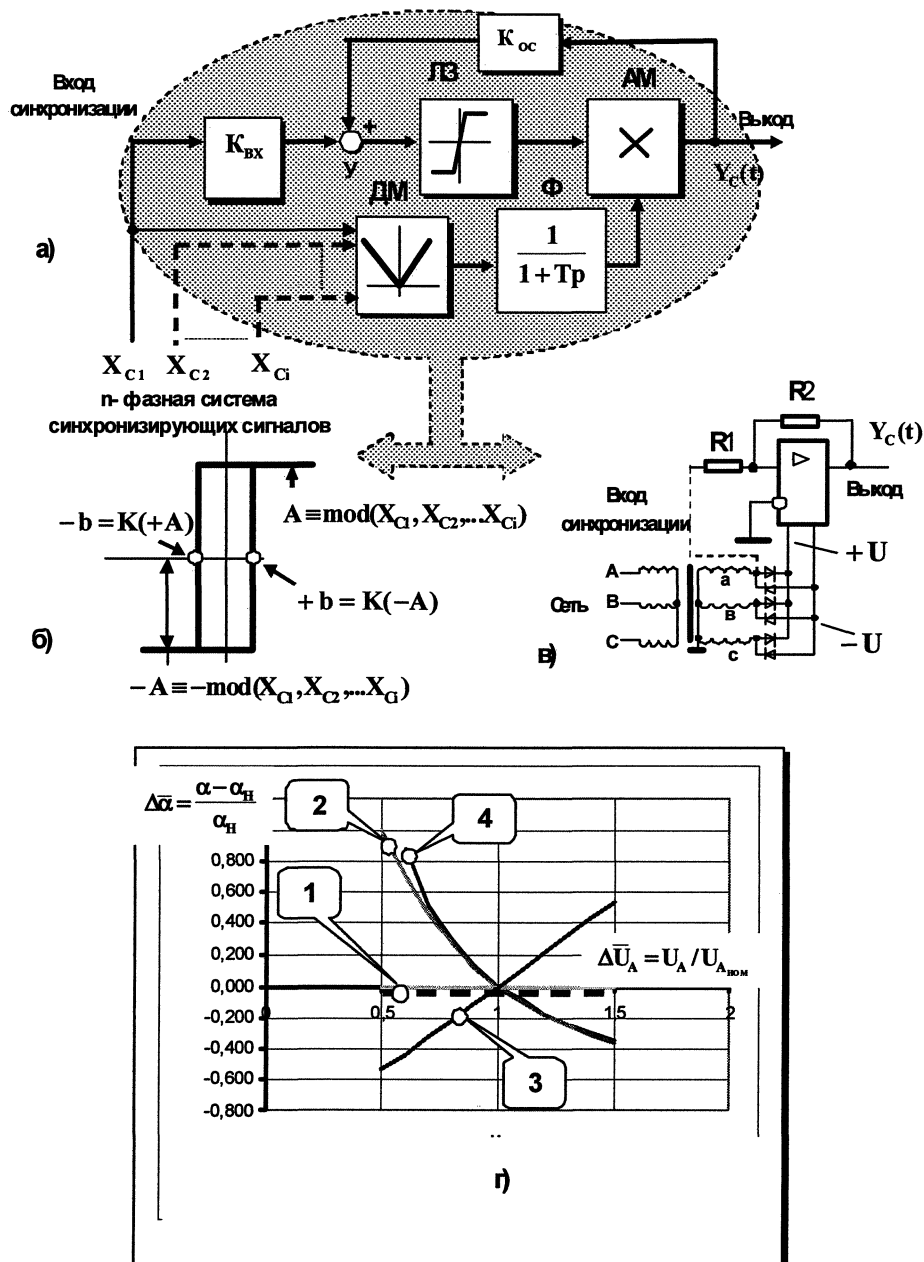


Рис. 3. Обобщенная структурная схема (а), характеристика «вход-выход» (б), пример технической реализации (в) и графики погрешности (г) адаптивного устройства синхронизации с зависимым уровнем фиксации синхронизирующего воздействия

## Преобразовательная техника

В результате демодуляции трехфазной системы напряжений  $a, b, c$  формируются напряжения постоянного знака  $+U$  и  $-U$  (рис. 4, а), которые определяют закон изменения вершины импульсов на выходе компаратора и, следовательно, характер его порогов переключения. При этом  $+U$  формирует порог фиксации  $-b(t)$ , а напряжение  $-U$  – пороговый уровень  $+b(t)$  (рис. 4, б). Во времени каждый из пороговых уровней  $\pm b(t)$  включает в себя периодическую пульсирующую составляющую фаз  $a, b, c$  (рис. 4, б). Путем соответствующего подбора амплитуды, например фазы  $a$  обеспечивается переключение УС в точках 1 и 2 (рис. 4, а, б, моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно).

В результате на выходе УС формируется импульсный сигнал  $Y_c(t)$  (рис. 4, в, г) с пульсирующей

амплитудой. При синхронном изменении амплитуды фаз напряжения сети (например, увеличении на  $\Delta A$ , рис. 4, б) происходит пропорциональный рост порогов фиксации  $\pm b(t)$  до уровня  $\pm b(t) \pm \Delta b$ . В результате точки фиксации 1 и 2 перемещаются вертикально в положения 1-1 и 2-2 соответственно (рис. 4, б), однако моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  переключения УС сохраняются неизменными. При этом ошибка синхронизации полностью отсутствует как при увеличении, так и при уменьшении амплитуд фаз напряжения сети (см. рис. 3, г, зависимость 1).

При этом схема системы синхронизации ТП (рис. 5) отличается от традиционной (см. рис. 1) тем, что в формировании сигнала синхронизации по каждому из каналов принимают участие две фазы напряжения сети. Так для канала фазы  $A$  синхронизирующим воздействием является

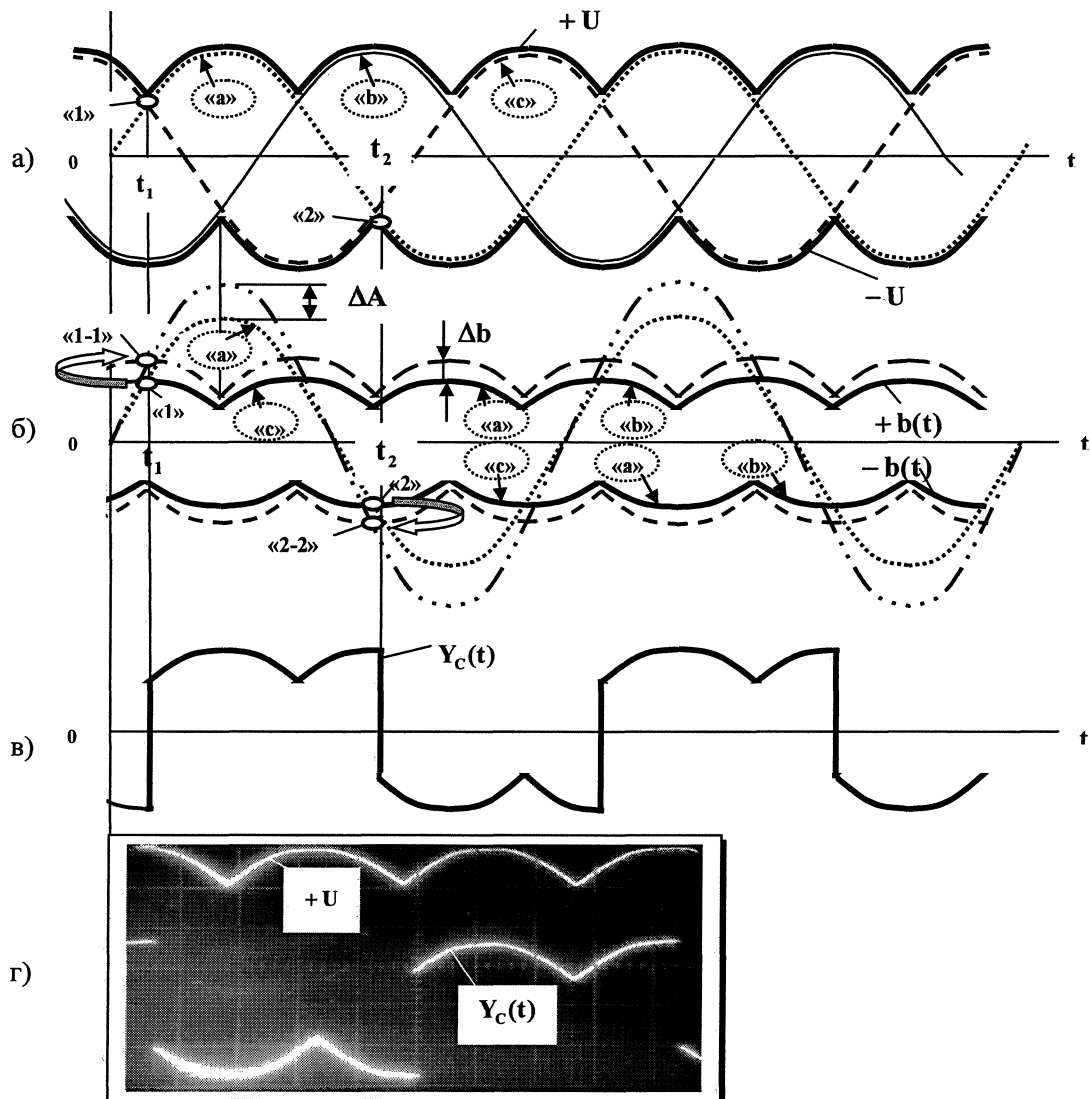


Рис. 4. Временные диаграммы сигналов (а, б, в) и осциллограмма (г) адаптивного устройства синхронизации при симметричной нестабильности фазных напряжений

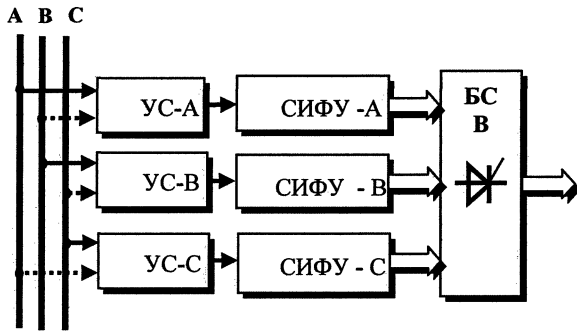


Рис. 5. Функциональная схема адаптивной синхронной системы управления ТП

непосредственно фазой *A*, а уровень фиксации определяется фазой *B*. Для канала фазы *B* уровень фиксации зависит от состояния фазы *C*, а в канале управления фазы *C* пороговый уровень диктуется фазой *A*.

Подобное положение отрицательно сказывается при работе ТП в случае асимметричного изменения амплитуд напряжений фаз сети.

Предположим, что на величину  $\Delta A$  умень-

шилась амплитуда фазы *b* (рис. 6 а). Это влечет за собой смещение уровня фиксации компаратора для сигнала синхронизации фазы *a* (рис. 6 б), в результате чего точки 1 и 2 перемещаются в положения 1-1 и 2-2 соответственно как по горизонтальной, так по вертикальной осям. При этом появляется ошибка синхронизации  $\Delta\alpha$  в фазе, амплитудное значение которой соответствует номинальному уровню. Аналогичная ошибка, только с противоположным знаком, будет и в случае, когда на величину  $\Delta A$  изменилась амплитуда фазы *a*, а фаза *b* осталась неизменной (рис. 6 в).

На рис. 3 г приведены результаты моделирования ТП при асимметрии фазных напряжений (зависимости 2, 3), когда только фаза *a* имеет нестабильную амплитуду.

В этом случае погрешность синхронизации в канале управления фазы *a* изменяется по кривой 2, а в фазе *c* соответствует зависимости 3 (кривая 4 соответствует схеме УС на рис. 2 а). Одновременно с этим для фазы *b*  $\Delta\alpha = 0$ , так как работа ее канала синхронизации зависит от фаз *b* и *c*, которые в данном случае имеют номинальное значе-

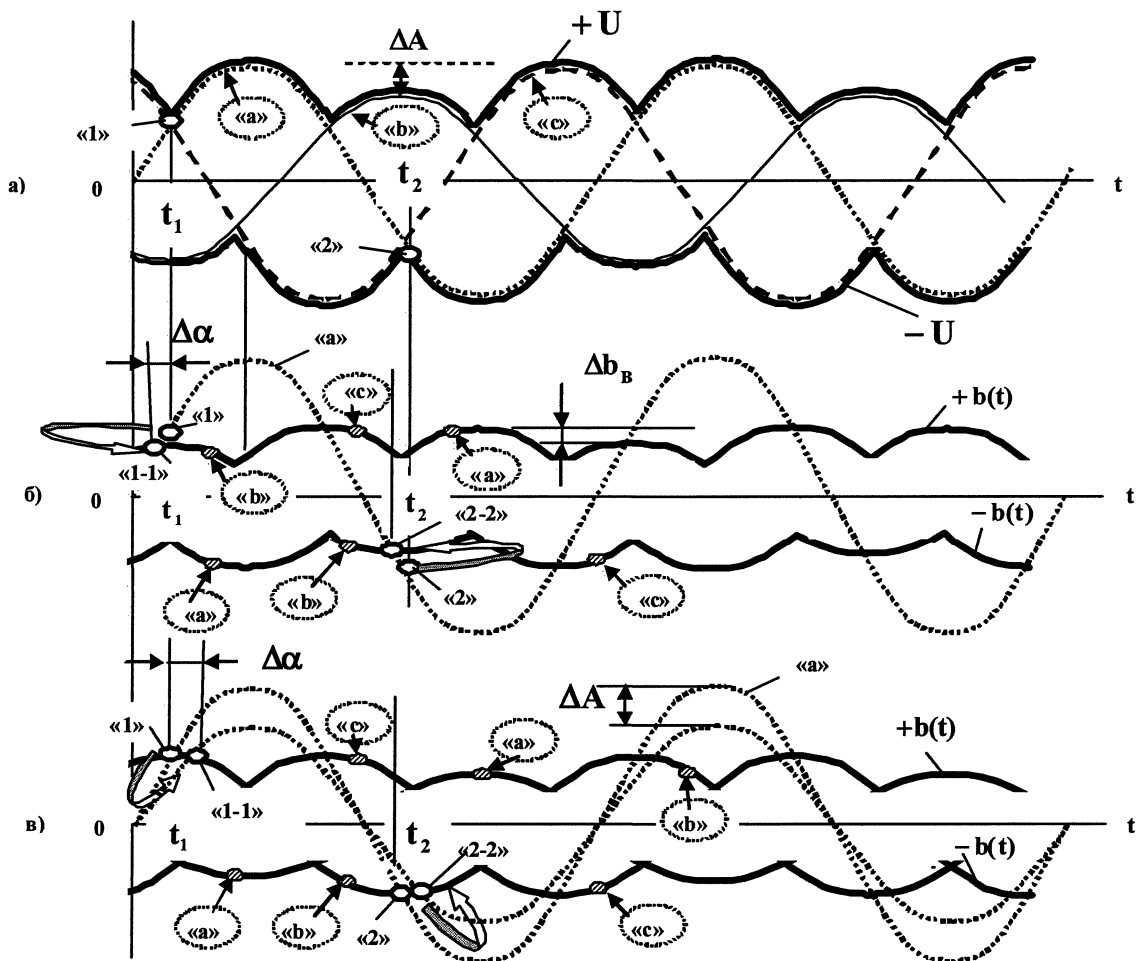


Рис. 6. Временные диаграммы сигналов адаптивного устройства синхронизации при нестабильности амплитуды фазы *b* и *a*

ние. Обращает на себя внимание тот фактор, что  $\Delta\bar{\alpha}$  для  $a$  и  $c$  (рис. 3, г, кривые 2, 3) изменяется в противоположных по знаку направлениях, что при определенных схмотехнических решениях в СИФУ и режимах работы ТП может вызвать эффект взаимной компенсации этих ошибок.

В любом случае рассмотренную адаптивную систему синхронизации ТП целесообразно рекомендовать к применению на объектах, где подавляющая доля результирующей нагрузки приходится на трехфазные потребители, когда наблюдается симметричная нестабильность по всем фазам одновременно.

### Литература

1. *Управление вентильными электроприводами постоянного тока* / Е.Д. Лебедев, В.Е. Неймарк, М.Я. Пистрак, О.В. Слежановский – М.: Энергия, 1970.
2. *Волович, Г.И. Схмотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств* / Г.И. Волович. – М.: ИД «Додэка-XXI», 2005.
3. *А.с. 1731014 СССР, H02M7/155. Система импульсно-фазового управления* / Л.И. Цытович, В.Г. Маурер, Р.М. Рахматулин. – № 4804663/07; заявлено 20.03.90; опубл. 15.04.92, Бюл. № 12.

Поступила в редакцию 20.01.2009 г.

**Цытович Леонид Игнатьевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электропривода Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: информационно-измерительные устройства и комплексы систем управления технологическими процессами.

Контактный телефон: 8-(351) 267-93-85.

**Tsitovich Leonid Ignatievich** – Doctor of technical science, Professor, Head of the Electric Drive department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: informational and measuring devices and complexes of control systems.

Contact phone: 8-(351) 267-93-85.

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

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

**Kachalov Andrey Valentinovich** – post-graduate student of the Electric Drive department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: control systems of electrical drives and installations.

Contact phone: 8-(351) 267-94-32.

**Дудкин Максим Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: элементы и устройства систем управления силовыми вентильными преобразователями.

Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Dudkin Maxim Mihailovich** – candidate for a scientific degree in technical sciences, associate professor of the Electric Drive department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: elements and devices of control systems of power converters.

Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

**Рахматулин Раис Мухибович** – ведущий инженер кафедры электропривода Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: элементы и устройства систем управления промышленными объектами.

Контактный телефон: 8-(351) 267-91-05.

**Rakhmatulin Rais Mukhibovich**, leading engineer of the Electric Drive department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: elements and devices of control systems of industrial installations.

Contact phone: 8-(351) 267-91-05.

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-83-52:621.771.016.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ НАТЯЖЕНИЯ В МЕЖКЛЕТЕВОМ ПРОМЕЖУТКЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

*И.Ю. Андрюшин, П.В. Шиляев, В.В. Головин  
г. Магнитогорск, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»*

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC CORRECTION OF TENSION IN STAND GAP OF BROAD-STRIP MILL OF HOT ROLLING

*I.Y. Andryushin, P.V. Shilyaev, V.V. Golovin  
Magnitogorsk, Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works»*

Представлены результаты экспериментальных исследований точности регулирования натяжения при применении разработанного способа компенсации статических отклонений скорости электропривода клетки. Рассмотрены схемы блока компенсации и переходные процессы для двух вариантов реализации способа: разгон электропривода перед захватом полосы валками и разгон непосредственно в момент захвата. Экспериментально подтверждена техническая эффективность реализации предложенного способа, заключающаяся в повышении точности регулирования натяжения и толщины полосы в динамических режимах.

*Ключевые слова: натяжение полосы, способ регулирования, техническая реализация, экспериментальные исследования.*

Outcomes of experimental researches of tension regulation accuracy while applying the designed mode of compensation of static deviations of stand electric drive velocity are presented. Circuits of block of compensation and transitions for two alternatives of the mode realization - acceleration of the electric drive before the capture of a strip by rolls and acceleration immediately at the moment of capture are surveyed. Engineering efficiency of the offered mode application is confirmed.

*Keywords: tension of a strip, regulation mode, engineering realization, experimental researches.*

Основным критерием, определяющим конкурентоспособность продукции широкополосных станов горячей прокатки, является повышение качества за счет минимизации разнотолщинности полосы. Эти параметры определяются условиями прокатки в чистовой группе клетей и в первую очередь точностью регулирования межклетевых натяжений, обеспечиваемой за счет системы автоматического регулирования натяжения и петли. Актуальность проблемы снижения разнотолщинности приобретает особую остроту в связи с переходом на прокатку полосы толщиной 1,2–2 мм, являющейся конечной продукцией прокатного передела. При этом максимальное внимание уделяется точности регулирования натяжения в дина-

мических режимах при захвате и выпуске полосы.

На рис. 1 представлены осциллограммы изменения скорости электроприводов клетей и углов подъема петледержателей чистовой группы стана 2500 горячей прокатки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). В главных электроприводах чистовой группы применены пропорциональные регуляторы скорости. Настройка П-регуляторов была проведена таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное быстродействие контура скорости при полном отсутствии перерегулирования. Это объясняется тем, что даже небольшая величина перерегулирования осложняет процессы, протекающие при захвате полосы. Как следует из осциллограмм,

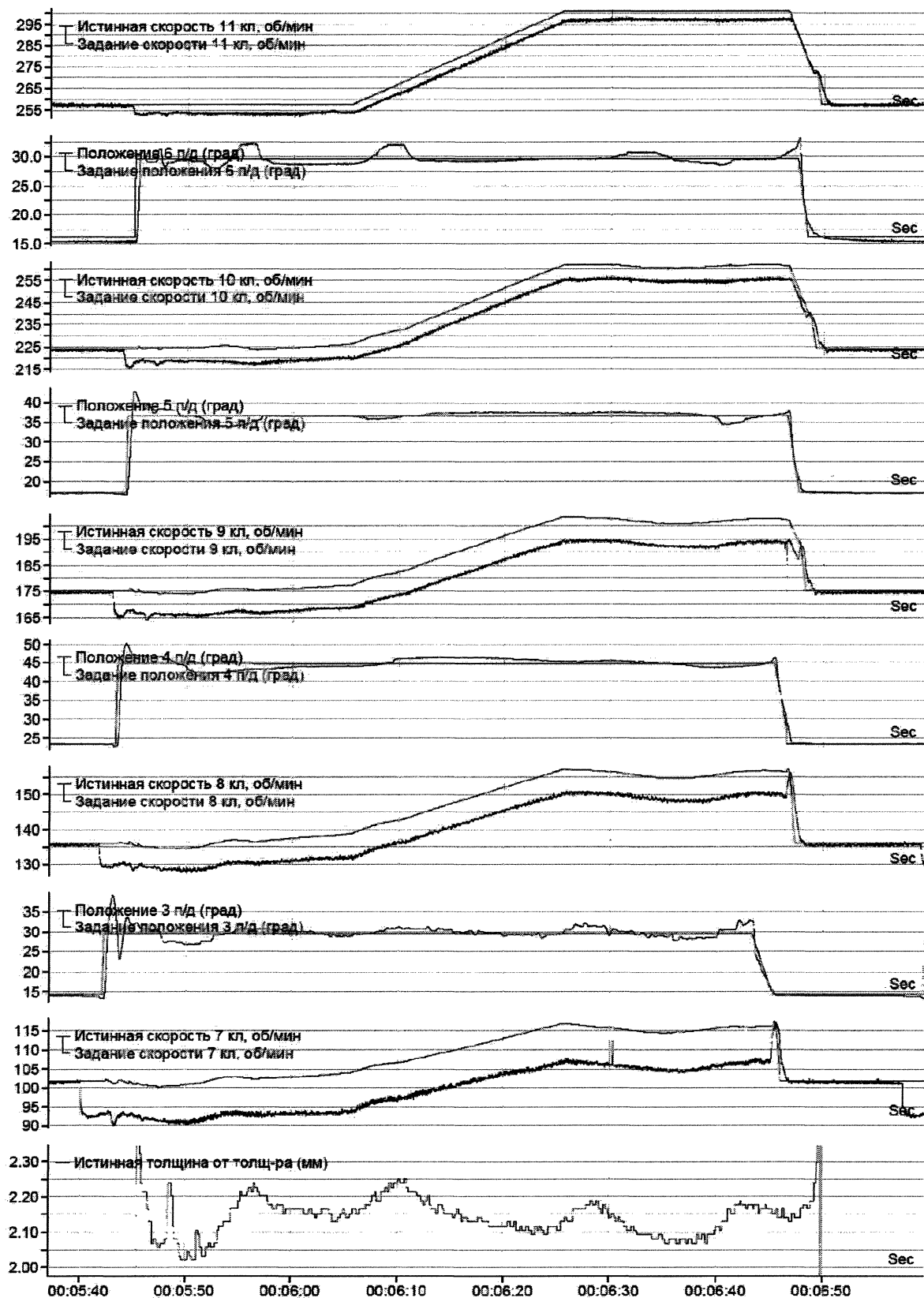


Рис. 1. Осциллограммы переходных процессов скорости клетей чистовой группы и выходной толщины при работе П-регуляторов скорости



динамическое отклонение (просадка) скорости при захвате полосы клетью больше, чем отклонение скорости в установившемся режиме (статическая просадка), что неизменно сказывается на уровне петли в межклетевом промежутке и является возмущением для контура регулирования высоты петли. Регулятор высоты петли выдает корректирующее воздействие на скорости всех предыдущих по отношению к данному промежутку клетей. Таким образом, очевидно, что перерегулирование в скорости при захвате одной из клетей вызывает переходный процесс во всей чистовой группе.

Кроме того, подъем петледержателей после захвата полосы последующей клетью также сопровождается перерегулированием угла подъема, достигающим 5–7 %. Указанные переходные процессы в конечном итоге приводят к отклонению выходной толщины от требуемых размеров, что наглядно показано на последней из представленных осциллограмм. Из рис. 1 видно, что прокатка переднего конца полосы приводит к значительному отклонению толщины головной части (на 30–35 %), которое превышает требуемые значения в несколько раз. Аналогичная разнотолщинность возникает при выпуске полосы. Это приводит к увеличению расходного коэффициента за счет увеличения обреза на концах рулона, составляющей 1,5–2 м.

В связи с необходимостью повышения точности регулирования геометрических размеров осуществляется реконструкция электрического оборудования и систем технологической автоматизации стана 2500. В ходе реконструкции осуществлен переход на цифровые системы управления электроприводами. Система автоматического управления режимами скорости (SPC) предназначена для формирования заданных значений скорости клетей и изменения их по определенному закону в процессе прокатки полосы. Задание скорости из SPC передается в интерфейсную программу управления главным приводом и затем по сети Profibus поступает в тиристорный преобразователь Simoreg [1].

Применение П-регуляторов скорости имеет существенный недостаток при управлении от математической модели. Математическая модель уровня 2 рассчитывает заданные значения скорости клетей для каждой из прокатываемых полос. Предварительно рассчитанные значения скорости поступают в качестве уставок для системы регулирования скорости. В ходе прокатки измеренные значения скорости передаются на уровень 2 и используются моделью для адаптации проведенных ранее предварительных расчетов. В процессе адаптации учету поддаются все составляющие скорости, внесенные в ходе прокатки: ручные коррекции, коррекции от системы регулирования положения петледержателей, ускорение прокатки. Однако статическая просадка скорости, возникающая под нагрузкой, не может быть учтена. При

последующих перерасчетах она вносит значительную погрешность регулирования. В силу особенностей построения программы модели такой параметр, как жесткость механической характеристики, учитывающий величину просадки скорости в зависимости от приложенной нагрузки, не может быть в нее внесен. В результате этого управление от математической модели становится практически невозможным.

Вместе с тем, применение П-регуляторов позволяет получить мягкие механические характеристики электроприводов клетей, делающие работу чистовой группы более устойчивой в случае появления управляющих и возмущающих воздействий.

Перечисленные недостатки вызывают необходимость применения в главных электроприводах клетей стана либо ПИ-регуляторов скорости (имеющих свои существенные недостатки), либо использования иных способов, обеспечивающих снижение статической просадки скорости. Исследования на математической модели показали возможность следующего решения: применения блока компенсации статической просадки в программе управления режимами скорости клетки. Данный блок осуществляет автоматический доразгон электропривода клетки непосредственно перед захватом полосы и содержит разомкнутый и замкнутый контуры компенсации, а также блок логики управления режимами. Функциональная схема, поясняющая предложенный способ, представлена на рис. 2 [2, 3].

На этапе настройки собрана экспериментальная информация о величинах отклонений скорости при различных моментах нагрузки для всех клетей. В результате были вычислены коэффициенты жесткости механических характеристик. В предварительных расчетах уставок математическая модель выдает значение расчетного момента прокатки для главного электропривода. С учетом коэффициента жесткости механической характеристики  $\beta$  вычисляется значение приращения скорости доразгона  $\Delta v$ . При появлении сигнала «Полоса в предыдущей клетке» значение компенсации  $\Delta v$  добавляется к заданной скорости клетки. Происходит доразгон на величину предполагаемой просадки скорости. После захвата полосы клетью ее скорость будет близка к заданному значению.

При определении коэффициентов жесткости механических характеристик по экспериментальным данным для электропривода каждой клетки определена просадка скорости при набросе нагрузки. В большинстве случаев заправка полосы в клетку осуществляется при работе в первой зоне регулирования скорости, т.е. при заправке магнитный поток остается неизменным. С учетом этого, зная ток и магнитный поток двигателя, не сложно определить момент двигателя и жесткость механической характеристики. Осциллограммы переходных процессов скорости и тока двигателя главного электропривода 11-й клетки показаны на

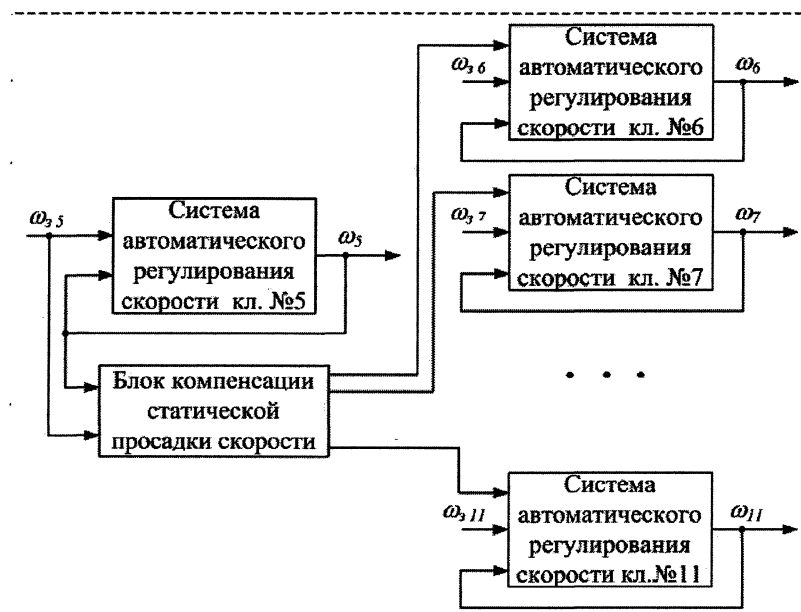


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования скорости клетей с доразгоном в режиме заправки

рис. 3. Как видно из рисунка, просадка скорости составляет 4 об/мин при изменении тока на 3165 А. Аналогичные замеры были проведены для большого количества полос различного сортамента, что позволило вычислить жесткость механических характеристик с высокой точностью.

Разомкнутый контур компенсирует просадку скорости на уровне 2 – 3 % разницы между заданным и истинным значениями. Кроме того, не учитывается влияние на нагрузку клетки дополнительных факторов: свойств полосы, изменения межвалкового зазора и т.д. Такая точность компенсации не является удовлетворительной, поэтому необходим замкнутый контур, отслеживающий реальные изменения скорости при изменении нагрузки.

При построении замкнутого контура необходимо учитывать, что регулятор не должен быть настроен с таким быстродействием, чтобы оказывать влияние на динамические режимы, так как это может привести к снижению устойчивости работы стана. Поэтому замкнутые контуры электроприводов клетей построены на основе И-регуляторов скорости с большой постоянной времени. Целью является получение максимально возможного быстродействия при полном отсутствии перерегулирования по скорости. Такая схема регулятора позволяет с достаточной степенью точности компенсировать просадку скорости клетки в установившемся режиме. Схема узла компенсации статической просадки скорости электропривода клетки представлена на рис. 4.

Определяющим с точки зрения быстродействия, а также наиболее неблагоприятным с точки зрения петлеобразования динамическим режимом

клетки является наброс нагрузки при входе металла в валки. И-регулятор имеет сравнительно низкое быстродействие и не влияет на процесс регулирования высоты петли в межклетевом промежутке. Остальные динамические процессы, возникающие в ходе прокатки (ускорение, коррекции скорости), протекают с более низким темпом и поэтому обработка их И-регулятором не представляет опасности с точки зрения устойчивости процесса прокатки.

На рис. 5 приведены осциллограммы скоростей электроприводов клетей при прокатке с подключенным узлом компенсации (с предварительным доразгоном электроприводов клетей). Выход на заданную скорость, вычисленную с учетом жесткости механической характеристики, осуществляется в период нахождения начала полосы в межклетевом промежутке до захвата валками последующей клетки (например, для клетки № 7 доразгон осуществляется от 90 до 100 об/мин, его начало соответствует моменту времени 01:51:35). Как следует из представленных осциллограмм, при точном расчете требуемой скорости захвата статические ошибки скоростей в режиме прокатки практически отсутствуют. Это приводит как к более точному поддержанию натяжения в режиме прокатки, так и к меньшему его перерегулированию в момент захвата полосы (5–10 % установившегося значения). Соответственно снижается динамическое отклонение толщины (до 18 % на выходе из чистовой группы).

Вместе с тем очевидно, что величина разности между заданной и истинной скоростями зависит от точности расчета момента прокатки, точности вычисления коэффициента жесткости механической характеристики  $\beta$  и соответственно точности

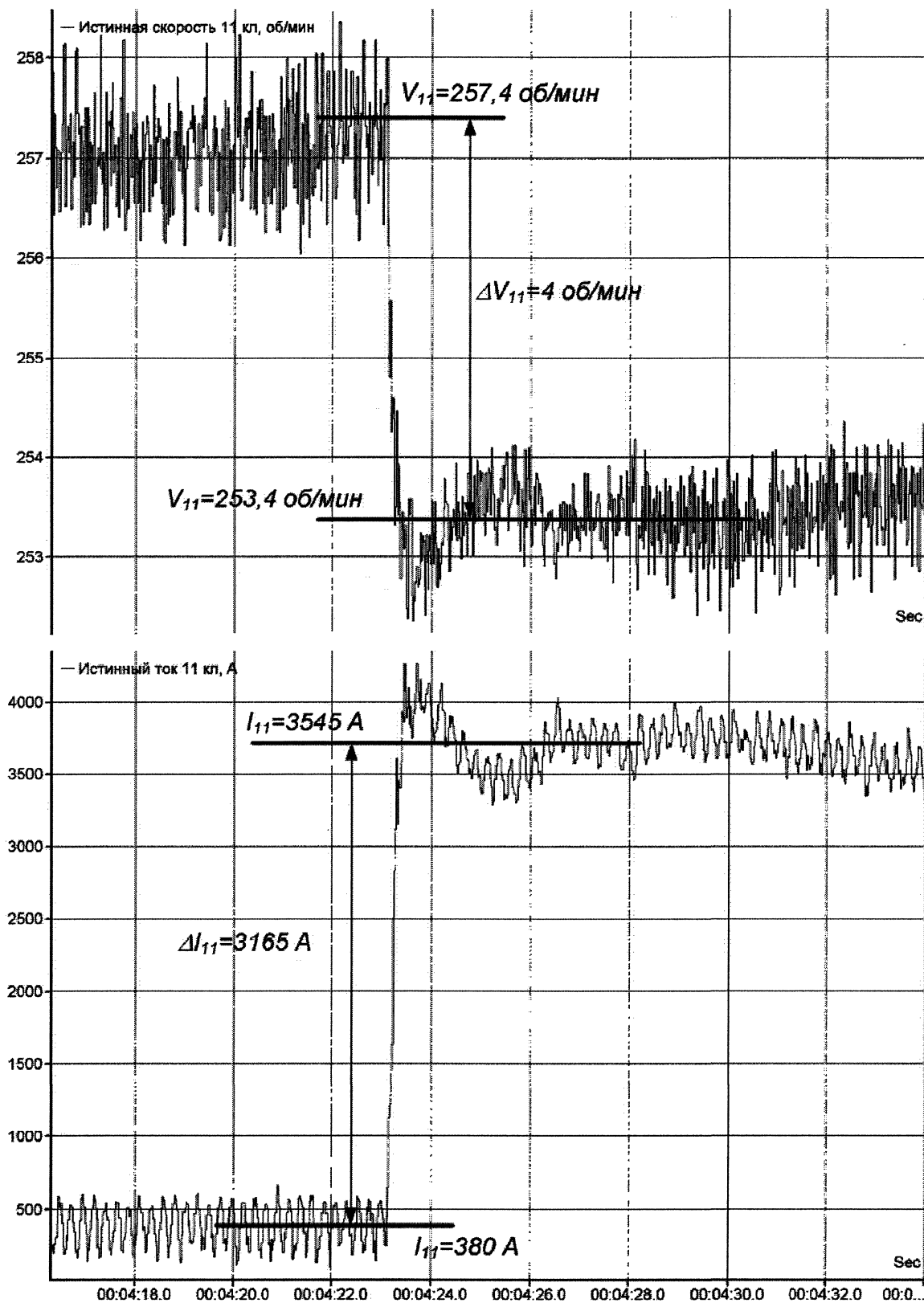


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов при входе металла в 11-ю клеть

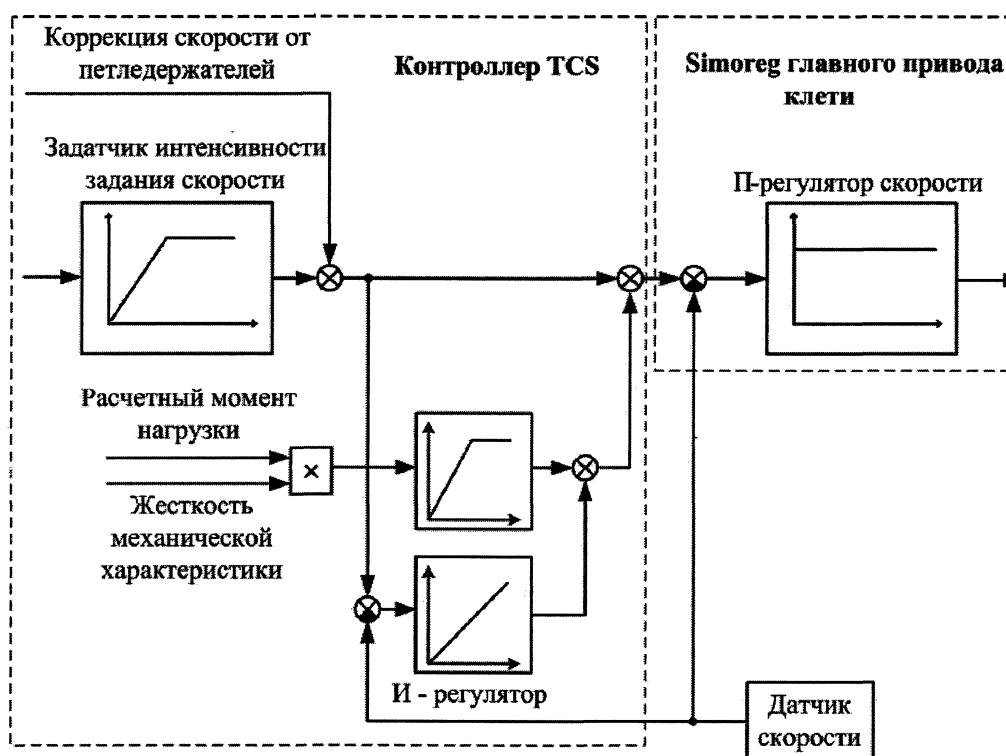


Рис. 4. Схема узла компенсации статической просадки скорости

вычисления сигнала  $\Delta n$  на дополнительный разгон электропривода клетки. Эти значения рассчитываются в модели по предварительно заданным параметрам (обжатия, скорости и др.). Добиться точного определения всех параметров удастся не во всех случаях, что не позволяет использовать преимущества предложенного способа в полной мере.

Для устранения отмеченного недостатка предложено осуществлять доразгон электропривода последующей клетки непосредственно в момент захвата полосы валками. В этом случае обеспечивается более точное вычисление момента двигателя по параметрам электропривода (току, магнитному потоку), которые непрерывно контролируются в процессе прокатки. Соответственно увеличивается точность вычисления требуемой скорости захвата, что обеспечивает более точную компенсацию просадки скорости клетки.

В подтверждение сказанному на рис. 6 представлены осциллограммы перечисленных выше параметров в режиме доразгона в момент захвата полосы валками. Видно, что быстрое действие электропривода по каналу задания достаточно, чтобы отработать режим захвата практически без динамических отклонений скорости. В результате повышается точность регулирования натяжения в режиме захвата и соответственно снижается переуправление толщины (до 13 % на выходе из чистовой группы).

Предложенный способ регулирования и схема построения узла компенсации отклонений скоро-

сти на основе сочетания двух контуров: замкнутого и разомкнутого в настоящее время используются в чистовой группе стана 2500. Многочисленные эксперименты показали, что таким образом можно наиболее эффективно снижать просадку скорости с наименьшим влиянием на устойчивость стана. При этом снижается разнотолщинность на концах полосы и соответственно снижается расходный коэффициент за счет уменьшения потерь металла с концевой обрезью.

## Выводы

1. В результате анализа режимов захвата полосы валками клеток чистовой группы стана 2500 ОАО «ММК» показаны высокие динамические отклонения натяжения за счет рассогласования скоростей смежных клеток межклетевого промежутка, связанных с применением пропорциональных регуляторов скорости главных электроприводов. Это приводит к увеличению разнотолщинности на концах рулона и делает практически невозможным управление от математической модели АСУ ТП 2-го уровня.

2. Предложен способ регулирования скорости с предварительным вычислением скорости захвата и соответствующим доразгоном электропривода последующей клетки во время нахождения полосы в межклетевом промежутке, обеспечивающий отсутствие статической ошибки скорости во время прокатки.

3. Предложена схема построения узла компенсации статической просадки скорости на основе

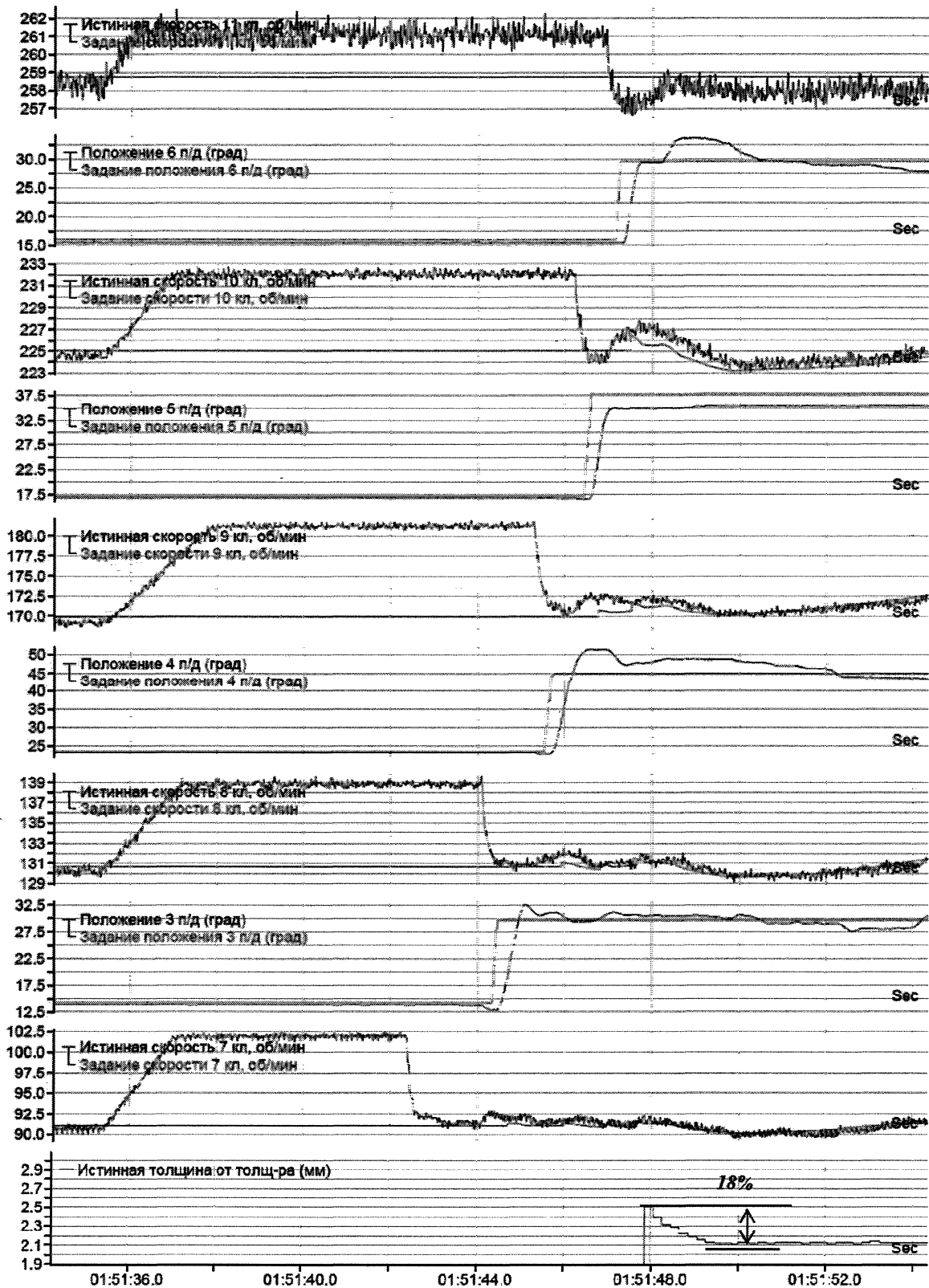


Рис. 5. Осциллограммы скоростей клетей и углов подъема петледержателей  
в системе с предварительным доразгоном

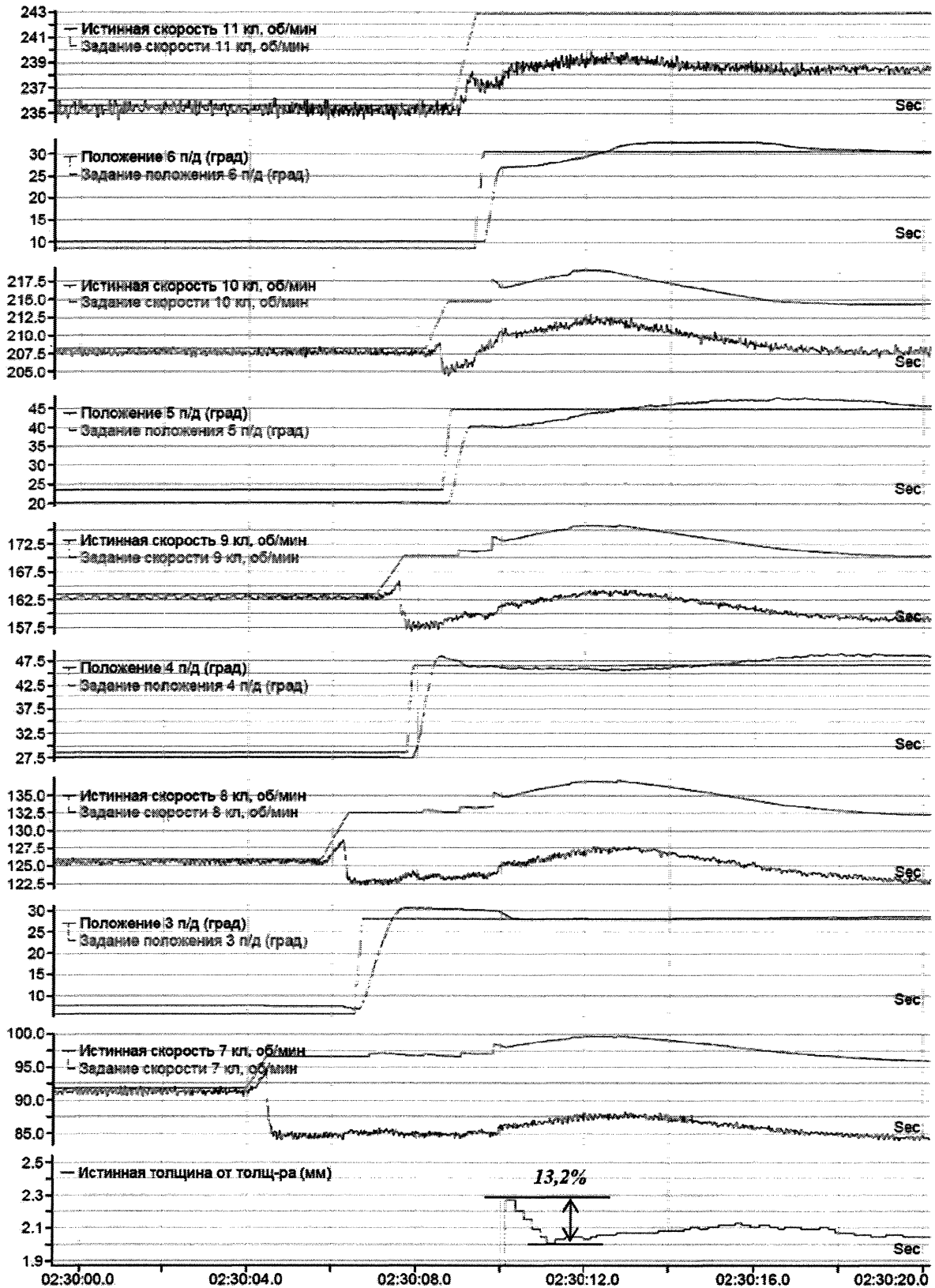


Рис 6. Осциллограммы регулирования скорости клеток с доразгоном в момент заправки

сочетания двух контуров: замкнутого и разомкнутого. При этом замкнутый контур обеспечивает снижение величины просадки скорости. Основная функция разомкнутого контура – уменьшение влияния замкнутого контура на процесс образования петли при захвате металла клетью.

4. Экспериментальные исследования подтвердили целесообразность применения предложенного способа, однако его эффективность зависит от точности предварительного вычисления требуемого приращения скорости.

5. Предложен вариант реализации способа с доразгоном электропривода последующей клетки непосредственно в момент захвата полосы валками. Это обеспечивает более точное вычисление момента двигателя и требуемой скорости захвата по параметрам электропривода. В результате увеличивается точность регулирования натяжения в межклетевом промежутке и соответственно снижается разнотолщинность полосы на концах рулона.

#### Литература

1. Формирование алгоритмов управления режимами электроприводов в АСУ ТП широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шильяев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин и др. // *Электромеханические преобразователи энергии: материалы Международной науч.-техн. конф.* – Томск: ТПУ, 2007. – С. 313–318.

2. Каскадное управление скоростными режимами широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шильяев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин и др. // *Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2007)*. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 417–421.

3. Технологические схемы управления электроприводами чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмушин, И.Ю. Андрюшин и др. // *Труды VII конгресса прокатчиков*. – М., 2007. – Т. 1. – С. 71–75.

Поступила в редакцию 15.02.2008 г.

**Андрюшин Игорь Юрьевич** – главный инженер управления главного энергетика – главный электрик ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Область научных интересов: автоматизированный электропривод, системы управления. Контактный телефон: 8-(3519) 29-09-12.

**Andryushin Igor Yurievich** – the chief engineer of principal power engineer department, the principal electrician of Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works». Scientific interests: automatic electric drive, control systems. Contact phone: 8-(3519) 29-09-12.

**Шильяев Павел Владимирович** – ОАО «ММК», начальник управления технического обслуживания и ремонтов электротехнического оборудования ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Область научных интересов: автоматизированный электропривод, силовая электроника, системы управления. Контактный телефон: 8-3519-01-89-38.

**Shilyaev Pavel Vladimirovich** – Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works», the chief of department of maintenance service and reconditioning of the electrotechnical equipment of Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works». Scientific interests: automatic electric drive, power electronics, control systems. Contact phone: 8-(3519) 01-89-38.

**Головин Вячеслав Васильевич** – кандидат технических наук, начальник центральной электротехнической лаборатории ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Область научных интересов: автоматизированный электропривод, системы управления. Контактный телефон: 8-(3519) 29-09-12.

**Golovin Vyacheslav Vasilievich** – candidate of technical science, the chief of the central electrotechnical laboratory of Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works». Scientific interests: automatic electric drive, control systems. Contact phone: 8-(3519) 29-09-12.

## СИНТЕЗ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНОВ С МНОГОВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ

*И.А. Селиванов, О.И. Петухова, И.В. Суздальев  
г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова*

## SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS OF CONTINUOUS ROLLING MILLS WITH MULTIROLLED CALIBERS

*I.A. Selivanov, O.I. Petuhova, I.V. Suzdalev  
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

Рассмотрены вопросы синтеза систем регулирования непрерывных станов с многовалковыми калибрами, построенных по принципу подчиненного регулирования параметров

*Ключевые слова:* синтез систем, непрерывные прокатные станы, многовалковые калибры, подчиненное регулирование параметров.

The article dwells on the problems of the synthesis of control systems of continuous rolling mills with multirolled calibers. The mills are constructed on the principle of dominated regulating parameters.

*Keywords:* synthesis of systems, continuous rolling mills, multirolled calibers, dominated regulating parameters.

При математическом описании объекта регулирования, каким является клеть прокатного стана, необходимо в первую очередь выделить те технологические факторы, которые являются определяющими в процессе деформации металла. К их числу можно отнести давление металла на валки  $P$ , момент прокатки  $M$ , опережение металла в очаге деформации  $S$ , межклетевые натяжения  $F$ , коэффициент трения  $f$ , предел текучести металла  $\sigma_s$ , скорость прокатки  $V$ , вытяжку в клетке  $\mu$  [1, 2]. Все эти параметры связаны между собой сложными нелинейными зависимостями.

В связи с тем, что в момент проектирования непрерывных станов полная информация об этих зависимостях отсутствует, при математическом описании целесообразно учесть наиболее весомые технологические параметры, а остальные считать постоянными. Учитывая сказанное и переходя к приращениям, очаг деформации  $i$ -й клетки можно описать линейными уравнениями [2]:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= k'_{p,i} \Delta F_{i-1} + k_{p,i} \Delta F_i; \\ \Delta M_i &= R_i \Delta F_{i-1} - R_i \Delta F_i; \\ \Delta S_i &= k'_{S,i} \Delta F_{i-1} + k_{S,i} \Delta F_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta F_{i-1}$ ,  $\Delta F_i$  – приращения заднего и переднего натяжений  $i$ -й клетки;

$R_i$  – радиус валков;

$k'_{p,i}$ ,  $k_{p,i}$ ,  $k'_{S,i}$ ,  $k_{S,i}$  – технологические коэффициенты (частные производные):

$$k'_{p,i} = \frac{\Delta P_i}{\Delta F_{i-1}}; \quad k_{p,i} = \frac{\Delta P_i}{\Delta F_i}; \quad k'_{S,i} = \frac{\Delta S_i}{\Delta F_{i-1}}; \quad k_{S,i} = \frac{\Delta S_i}{\Delta F_i}.$$

Технологические коэффициенты можно определить с помощью аналитических формул [3].

При абсолютно жесткой полосе (упругое удлинение  $\varepsilon = 0$ ) приращение переднего межклетевого натяжения описывается уравнением [4]

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= \frac{k_{n,i}}{1 + T_{n,i} P} \left[ \frac{\Delta V_{b,i+1}}{\mu_{i+1}} (1 + S_{i+1}) - \Delta V_{b,i} (1 + S_i) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\Delta V_{b,i+1}}{\mu_{i+1}} k_{S,i+1} \Delta F_{i+1} - V_{b,i} k'_{S,i} \Delta F_{i-1} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_b$  – линейная скорость валков

$$V_b = \frac{\omega R}{j}, \quad (3)$$

$\omega$  – угловая скорость двигателя;

$R$ ,  $j$  – радиус рабочих валков и передаточное число редуктора;

$S$  – опережение металла в очаге деформации;

$\Delta F_{i-1}$ ,  $\Delta F_i$ ,  $\Delta F_{i+1}$  – приращения натяжения между  $(i-1)$ -й и  $i$ -й,  $i$ -й и  $(i+1)$ -й,  $(i+1)$ -й и  $(i+2)$ -й клетями;



$k_{п,i}$ ,  $T_{п,i}$  – коэффициент передачи и постоянная времени полосы в  $i$ -м промежутке (между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й клетями),

$$k_{п,i} = \frac{1}{k_{S,i}V_{в,i} - k'_{S,i+1}V_{в,i+1}/\mu_{i+1}}, \quad (4)$$

$$T_{п,i} = \frac{l_i k_{п,i}}{E_y Q_i}, \quad (5)$$

где  $E_y$  – модуль упругости полосы  $E_y = 2,02 \cdot 10^5$  н/мм<sup>2</sup>;

$Q_i$  – поперечное сечение полосы в  $i$ -м промежутке;

$l_i$  – длина  $i$ -го межклетевого промежутка.

Учитывая, что  $V_{в,i} \approx V_{в,i+1}/\mu_{i+1}$ ;  $k_{S,i} \approx -k_{S,i+1}$ , последнее уравнение можно привести к виду

$$k = A_i / V_{в,i}, T_{п,i} = V_{в,i} B_i, \quad (6)$$

где  $A_i$ ,  $B_i$  – коэффициенты, не зависящие от скорости:

$$A_i = \frac{1}{k_{S,i} - k'_{S,i+1}} \approx \frac{1}{2k_{S,i}}, \quad (7)$$

$$B_i = \frac{l_i A_i}{E_y Q_i} = \frac{l_i}{2k_{S,i} E_y Q_i}. \quad (8)$$

Считая, что система управления электроприводом клетки – двухконтурная с контурами тока и скорости [4], и используя уравнения (1) и (2), структурную схему электропривода  $i$ -й клетки с учетом силовой связи клеток через полосу представить в виде, приведенном на рис. 1.

На этой схеме приняты следующие обозначения:

$I$ ,  $E$  – ток и ЭДС двигателя;

$c$  – произведение магнитного потока на конструктивную постоянную,  $c = k\Phi$ ;

$T_m$ ,  $T_y$  – электромеханическая и электромагнитная постоянные времени;

$T_\mu$ ,  $k_{пр}$  – постоянная времени и коэффициент передачи тиристорного преобразователя;

$R_\Sigma$  – эквивалентное сопротивление якорной цепи;  $k_t$ ,  $k_c$  – коэффициенты обратной связи по току и скорости;

$H_{рт}$ ,  $H_{рс}$  – передаточные функции регуляторов тока и скорости.

Пренебрегая перекрестными связями в объекте регулирования ( $\Delta V_{в,i+1} = 0$ ,  $\Delta F_{i-1} = 0$ ,  $\Delta F_{i+1} = 0$ ) и внутренней связью по ЭДС двигателя [6], после структурных преобразований схема рис. 1 приводится к виду, позволяющему приступить к синтезу контуров регулирования (рис. 2).

Постоянная времени полосы  $T_{п,i}$  [4] во время преобразований не учитывалась.

На структурной схеме рис. 2 приняты следующие обозначения:

$k_d$  – коэффициент передачи двигателя,

$$k_d = \frac{c^2 j^2 V_{в}}{R_\Sigma R^2 (1+S)A} = \frac{c^2 j\omega}{R_\Sigma (1+S)A}, \quad (9)$$

$T'_m$  – электромеханическая постоянная с учетом силовой связи между клетями

$$T'_m = k_d T_m, \quad (10)$$

$k_F$  – коэффициент передачи полосы

$$k_F = \frac{A(1+S)R}{V_{в} c j} = \frac{A(1+S)R}{\omega c}, \quad (11)$$

$H_{рн}$  – передаточная функция регулятора натяжения;

$k_p$  – технологический коэффициент,

$$k_p = \Delta P / \Delta F.$$

На структурной схеме и в последних уравнениях индекс  $i$  опущен, так как все переменные, коэффициенты, передаточные функции относятся только к  $i$ -й клетке.

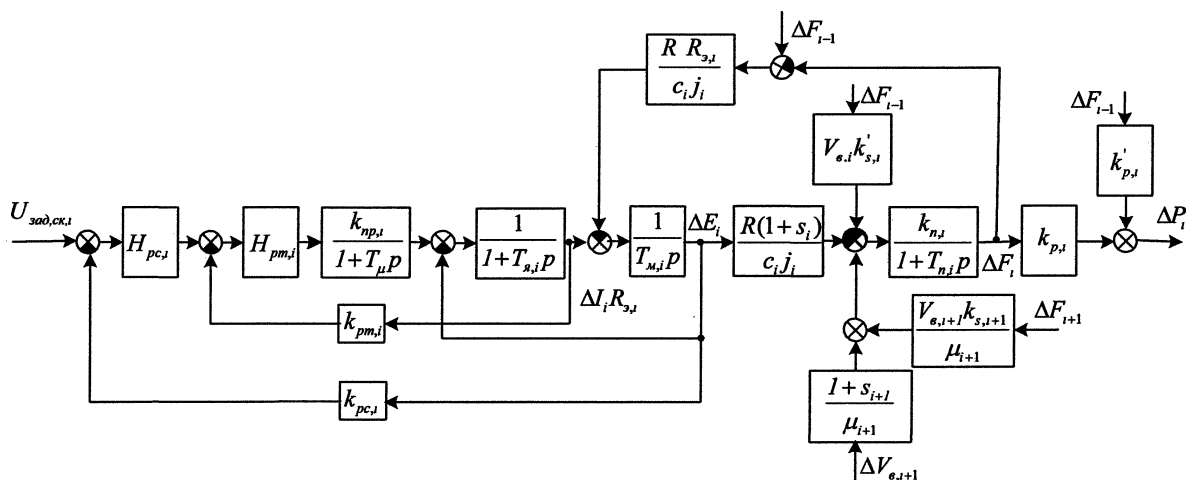


Рис. 1. Структурная схема электропривода клетки непрерывного стана

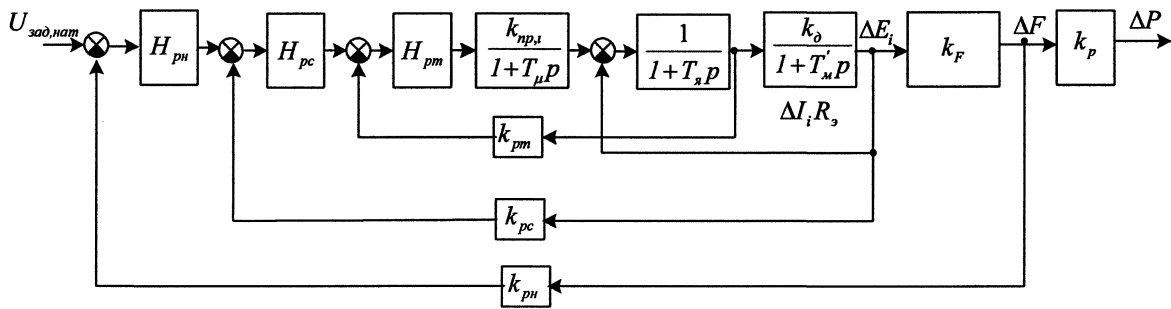


Рис. 2. Преобразованная структурная схема электропривода клетки

Для получения модульного оптимума при регулировании тока в непрерывном режиме преобразователя передаточная функция регулятора тока должна иметь вид [3]

$$H_{р\tau} = \frac{1 + T_{я} p}{2T_{\mu} p} \frac{1}{k_{пр} k_T} \quad (12)$$

Для адаптивного регулятора тока, реализуемого схемой рис. 3, параметры резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсатора  $C$  рассчитываются по условиям:

$$R_1 C = 2T_{\mu} k_{пр} k_T; \quad R_2 C = T_{я}.$$

Сопротивление резистора  $R_3$ , уменьшающего постоянную времени регулятора тока в прерывистом режиме, определяется по условию

$$R_3 = R_2 / (20 - 50).$$

Получение модульного оптимума при регулировании скорости несколько осложняется тем, что в передаточную функцию регулятора скорости

$$H_{рс} = \frac{(1 + T_{м}' p) k_T}{4T_{\mu} p k_d k_c} \quad (13)$$

входят коэффициент  $k_d$  и постоянная времени  $T_{м}'$ , зависящие от скорости двигателя  $\omega$ . Разделение пропорционально-интегрального регулятора скорости на пропорциональный и интегральный регуляторы дает:

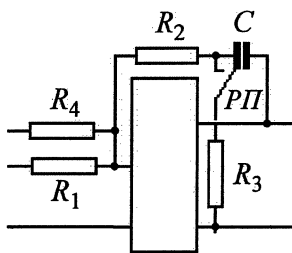


Рис. 3. Адаптивный регулятор тока

$$H_{рс} = \frac{T_{м} k_T}{4T_{\mu} k_c} + \frac{k_{ин}}{p} \frac{1}{\omega} = k_{рс} + \frac{k_{ин}}{p} \frac{1}{\omega}, \quad (14)$$

где

$$k_{ин} = \frac{k_T R_3 R (1 + S)}{8T_{\mu} k_c c^2 j k_S}.$$

Из (14) видно, что получение модульного оптимума при любых скоростях двигателя возможно введением в канал интегрального регулятора блока деления. При отсутствии полосы в валках для получения оптимальных процессов необходимо интегральный канал исключить из регулятора скорости.

Принципиальная схема регулятора скорости приведена на рис. 4.

Модульный оптимум контура регулирования натяжения обеспечивается регулятором с передаточной функцией

$$H_{рн} = \frac{k_c c k_S}{4T_{\mu} k_n (1 + S)} \frac{\omega}{p} = \omega \frac{k_{рн}}{p}, \quad (15)$$

где

$$k_{рн} = \frac{k_c c k_S}{4T_{\mu} k_n (1 + S)}.$$

Принципиальная схема регулятора натяжения приведена на рис. 5.

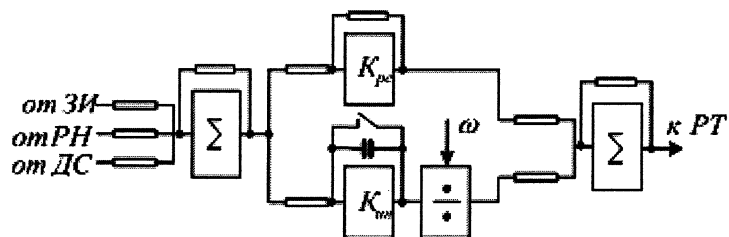


Рис. 4. Адаптивный регулятор скорости

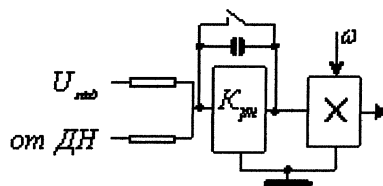


Рис. 5. Регулятор натяжения

Создание систем прямого регулирования размеров для станков с многовалковыми калибрами не было возможным, так как отсутствовали надежные датчики размеров, способные проводить измерения размеров раската по нескольким осям. В связи с этим для станков возможно лишь применение систем косвенного регулирования размеров.

Одним из энергосиловых параметров, косвенно характеризующих размеры раската, является давление металла на валки. При постоянном давлении стабилизируется размер раската при изменении таких технологических параметров, как коэффициент трения, предел текучести и диаметр исходной заготовки. Для обеспечения модульного оптимума передаточная функция регулятора давления в трехконтурной системе должна иметь вид

$$H_{\text{рд}} = \frac{k_c c k_S \omega}{4T_{\mu} k_p k_{\text{дав}} (1+S)p} = \omega \frac{k_{\text{рд}}}{p}, \quad (16)$$

где  $k_{\text{дав}}$  – коэффициент обратной связи по давлению металла на валки.

Регулятор давления реализуется схемой, подобной схеме рис. 5.

#### Литература

1. Файнберг, Ю.М. Автоматизация непрерывных станков горячей прокатки: монография / Ю.М. Файнберг – М.: Металлургиздат, 1963. – 326 с.
2. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации: монография / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургиздат, 1975. – 336 с.
3. Поляков, М.Г. Деформация металла в многовалковых калибрах: монография / М.Г. Поляков, Б.А. Никифоров, Г.С. Гун. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.
4. Селиванов, И.А. Влияние силовой связи между клетями непрерывного стана на структуру системы регулирования скорости / И.А. Селиванов, Ю.А. Крылов // Известия вузов. Электромеханика, 1977. – № 6. – С. 696–700.

Поступила в редакцию 08.02.2008 г.

**Селиванов Игорь Андреевич** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Электроника и микроэлектроника». Область научных интересов: автоматизированные электромеханические системы металлургического производства. Контактный телефон: 8–(3519) 22–72–79.

**Selivanov Igor Andreevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, the Head of the Electronics and Microelectronics department. Contact phone: 8–(3519) 22–72–79.

**Петухова Ольга Игоревна** – доцент кафедры «Электротехнические системы и электротехника». Область научных интересов: электроприводы непрерывных прокатных станков. Контактный телефон: 8–(3519) 29–84–16.

**Petukhova Olga Igorevna** – associate professor of the Electrical Engineering and Electrical Systems department. Contact phone: 8–(351) 29–84–16.

**Суздаев Игорь Вячеславович** – аспирант кафедры «Электроника и микроэлектроника». Область научных интересов: электроприводы прокатных станков с многовалковыми калибрами. Контактный телефон: 8–(3519) 29–85–86.

**Suzdalev Igor Vyacheslavovich**, post-graduate student of the Electronics and Microelectronics department. Contact phone: 8–(351) 29–85–86.

## ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗАДАНИЙ СЛЕДЯЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

С.П. Лохов, Д.Н. Кравец, А.П. Сивкова  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## FORMATION OF SIGNALS OF TASKS WITH THE TRACKING FREQUENCY CONVERTER IN ELECTRIC DRIVE

S.P. Lokhov, D.N. Kravets, A.P. Sivkova  
Chelyabinsk, SUSU

Доказана неприемлемость формирования сигналов заданий по частоте  $\omega(t)$  следящим преобразователям частоты по, казалось бы, «очевидным» формулам  $a = \sin(\omega t)$ ,  $b = \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ,  $c = \sin(\omega t + 2\pi/3)$ . Это видно на диаграммах интегралов сигналов заданий  $\int a dt$ , которые пропорциональны магнитным индукциям на грузок (трансформатор, двигатель). Предложено  $\omega t$  заменить на  $\varphi = \int \omega dt$ . Далее исследованы три варианта решения  $\sin(\varphi)$ ,  $\omega \sin(\varphi)$  и  $d\omega/dt \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi)$ .

*Ключевые слова:* следящий преобразователь частоты, задание, частота, магнитная индукция, трансформатор, двигатель.

Unacceptability of formation of signals of tasks basing on the frequency  $\omega(t)$  with the following frequency converter under seeming "obvious" formulas  $a = \sin(\omega t)$ ,  $b = \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ,  $c = \sin(\omega t + 2\pi/3)$  is proved. It is clearly seen on diagrammes of integrals of signals of tasks  $\int a dt$  which are proportional to magnetic inductions of loadings (the transformer, the engine). It is offered to replace  $\omega t$  with  $\varphi = \int \omega dt$ . Further three variants of the decision  $\sin(\varphi)$ ,  $\omega \sin(\varphi)$  and  $d\omega/dt \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi)$  are investigated.

*Keywords:* tracking frequency converter, task, frequency, magnetic induction, transformer, engine.

При разработке микропроцессорной системы управления асинхронным двигателем (АД) с фазным ротором нам потребовалась трехфазная симметричная система импульсов переменной частоты с реверсом, для чего мы использовали тригонометрические функции:

$$\begin{aligned} a &= \sin(\omega t), \quad b = \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ c &= \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

и следили за их моментами переходов через нуль. Первые же эксперименты на ЭВМ при линейном (пуск двигателя) и синусоидальном изменении скорости задания  $\omega(t)$  указали на ошибочность такого «очевидного» решения. Диаграмма эксперимента при синусоидальном законе изменения задания показана на рис. 1 сверху. Далее справа за пределами экрана частота сигналов все повышается до бесконечности, причем на участках с  $\omega = 0$  частоты достигают максимальных значений вместо ожидаемых близких к нулю. Из экспериментальной диаграммы видно, что на частоту сигналов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  больше влияет скорость (производная) изменения задания  $\omega'(t)$ , а не его вели-

чина  $\omega$ . Потребовалось объяснение физики обнаруженного явления.

Рассмотрим момент времени  $t_0$  где-то в середине процессов (см. рис. 1) после их начала при  $t = 0$ . В этой точке величину задания обозначим  $\omega_0$ , а его производную или наклон  $\omega_0'$ . Введем новый смещенный по времени аргумент  $\tau = t - t_0$ . Предположим, что с момента  $\tau = 0$  задание продолжит изменяться по линейному закону с указанным наклоном. Тогда формула (1) только для  $a$  запишется и преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} a &= \sin[(\omega_0 + \omega_0' \tau)(t_0 + \tau)] = \\ &= \sin[(\omega_0 + \omega_0' t_0) \tau + \omega_0 t_0 + \omega_0' \tau^2]. \end{aligned} \quad (2)$$

Первый член под обозначением синуса в преобразованной формуле назовем «мгновенной частотой» на момент  $t_0$ :

$$\Omega_0 = \omega_0 + \omega_0' t_0. \quad (3)$$

Второй член в правой формуле (2) – постоянный на момент  $t_0$  угол сдвига, а последним членом можно пренебречь из-за малости величины  $\tau^2$ . Из формулы (3) видим, что с увеличением времени все больше сказывается величина производной

сигнала задания  $\omega_0'$ . Это подтверждает и эксперимент на ЭВМ (см. рис. 1), где поведение сигналов соответствует формуле (3), когда все большую роль играет производная задания. Поэтому «очевидные» формулы (1) не применимы для решения поставленной задачи, но физика процессов на рис. 1 сверху стала понятной.

Выход из ситуации нам подсказал использованный в рассуждениях идеальный трехфазный фазовращатель на АД с фазным ротором, в котором поворот фазы определяет угол поворота ротора  $\varphi$ , а не скорость. При постоянной скорости АД ведет себя как идеальный преобразователь частоты. Угол определяется интегралом скорости с точностью до постоянной интегрирования  $C$ :

$$\varphi = \int \omega dt + C. \quad (4)$$

Теперь формулы (1) переписутся в другом виде:

$$\begin{aligned} a &= \sin(\varphi), \quad b = \sin(\varphi - 2\pi/3), \\ c &= \sin(\varphi + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (5)$$

При постоянной скорости  $\omega = \text{const}$  формулы (5) преобразуются в свой частный случай – в формулы (1). Диаграммы эксперимента на ЭВМ по формулам (4) и (5) приведены на рис. 2.

Так были получены трехфазные частотно-регулируемые аналоговые сигналы (5), моменты переходов через нуль которых определили нам фронты искомым импульсов. Сразу же возникла вторая более общая задача формирования аналоговых сигналов заданий следящим преобразователям частоты с нагрузкой в виде электромагнитных исполнительных устройств (трансформаторов, двигателей). Мы должны исключить возможность насыщения магнитопроводов этих устройства и обеспечить их перемагничивание по симметричным циклам. Такое требование следует применить и к электрическим машинам, хотя неприятные последствия несимметричного перемагничивания в них значительно ослаблены воздушным зазором. Магнитная индукция в магнитопроводе трансформатора изменяется примерно пропорционально интегралу приложенного к его обмотке напряжения. На рис. 1 и 2 снизу приведены диаграммы интегралов сигналов  $a, b, c$  (или индукций в магнитопроводах), обозначенные теми же буквами.

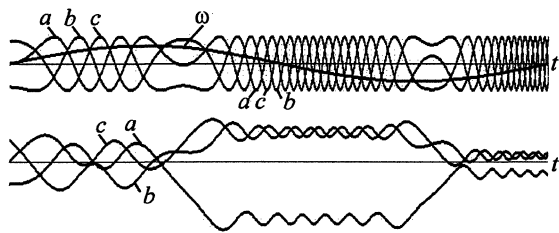


Рис. 1. Сигналы по формулам (1) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении  $\omega$

Видим, что никакой электромагнитный аппарат не выдержит таких напряжений, как сигналы по формулам (1) и (5), на своих обмотках.

В частотно-регулируемом приводе переменного тока по сути такая же проблема давно решена подачей на обмотки напряжений, пропорциональных их частоте. Для сигнала  $a$  (не будем далее писать формулы со сдвигами для фаз  $b$  и  $c$ ) формула (5) запишется в виде:

$$a = \omega \sin(\varphi). \quad (6)$$

Результаты эксперимента с формулами (4) и (6) приведены на рис. 3.

Здесь интегралы (индукции) оказались смещенными на постоянные величины, которые скомпенсированы выбором ненулевых начальных значений интегралов или постоянных интегрирования  $C$  в (4), что видно на левой границе нижнего рис. 3. Теперь мы получили приемлемые значения индукции на нижних диаграммах, но моменты переходов через нуль сигналов на верхних диаграммах отличаются от таковых на рис. 2. Что делать, если мы имеем два приемлемых разных решения исходной задачи?

Продолжим рассуждения. Ничто не мешает нам в приведенных выше формулах заменить синусы на косинусы с тем же результатом. Эксперименты на ЭВМ подтвердили это. Но тогда формулы (6) являются производными от формул (5). Когда надо отделить постоянную или медленно изменяющуюся составляющую в сигнале, надо продифференцировать его! Продолжим дифференцирование, сформируем следующий вид сигналов задания (7) как производные от сигналов (6):

$$a = d\omega/dt \cdot \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi). \quad (7)$$

Полученные на ЭВМ диаграммы сигналов по формулам (4) и (7) показаны на рис. 4.

Мы получили уже третье «инженерно приемлемое» решение первой, дискретной задачи и второе решение следующей, аналоговой. Последние диаграммы на рис. 4 более приятны. Например, в отличие от рис. 3 снизу процессы начинаются и кончаются нулевыми начальными значениями или с размагниченных магнитопроводов. Задавать правильные начальные индукции на рис. 3 снизу – сложная инженерная задача.

Для двух последних предложений (6) и (7) на рис. 5 построены фазовые траектории зависимо-

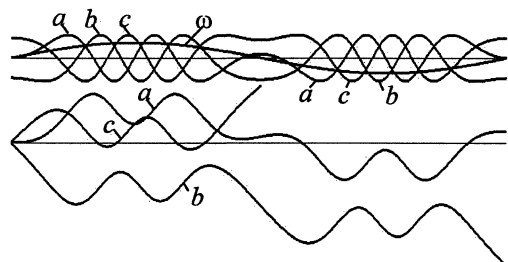


Рис. 2. Сигналы по формулам (4), (5) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении  $\omega$

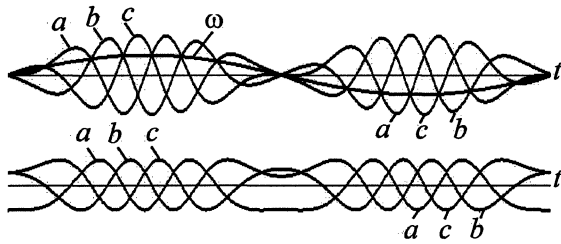


Рис. 3. Сигналы по формулам (4), (6) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении  $\omega$

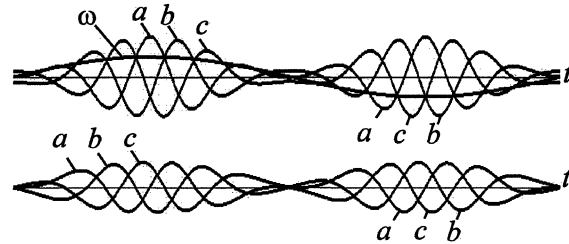


Рис. 4. Сигналы по формулам (4), (7) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении  $\omega$

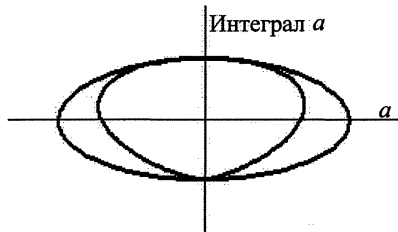


Рис. 5. Фазовые траектории сигналов и их интегралов за первый полупериод изменения  $\omega$  для рис. 3

стей интегралов сигналов (индукций) от самих сигналов (почти напряженностей). Эти траектории имеют родство с петлями гистерезиса, они характеризуют процессы в магнитопроводах.

И опять фазовые траектории для сигнала по формуле (7) и рис. 4 получились самые приятные для «инженерного взгляда».

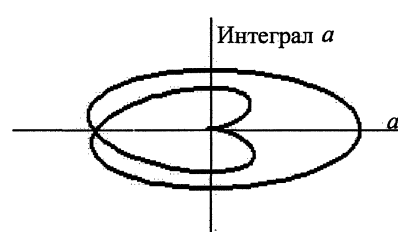


Рис. 6. Фазовые траектории сигналов и их интегралов за первый полупериод изменения  $\omega$  для рис. 4

### Выводы

Сигналы заданий следящим преобразователям частоты можно формировать по формулам (4) – (7), но ни в коем случае по «очевидной» формуле (1). Результаты получились различными, поэтому требуется дополнительный анализ наших «инженерных» предложений.

*Поступила в редакцию 11.01.2009 г.*

**Лохов Сергей Прокопьевич** – профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», доктор технических наук. Выпускник ЮУрГУ 1968 года. Научные интересы связаны с теоретическими основами электротехники, силовой электроники, моделированием, численными методами. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Lokhov Sergey Prokopievich** – professor of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University, Doctor of technical science. He graduated from this department in 1968. Scientific interests: theory of electrical engineering, power electronics, simulation, numerical methods. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

**Кравец Денис Николаевич** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Выпускник этой кафедры 2005 года. Научные интересы связаны с программированием. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Kravets Denis Nikolaevich** – post-graduate student of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University. He graduated from this department in 2005. Scientific interests: programming. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

**Сивкова Анна Прокопьевна** – ассистент кафедры электропривода и автоматизации промстановок. Выпускник ЮУрГУ 1981 года. Научные интересы связаны с силовой электроникой. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Sivkova Anna Prokopievna** – assistant of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University. She graduated from this department in 1981 year. Scientific interests: power electronics. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

## ВНЕДРЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ШАХТНЫЙ САМОХОДНЫЙ ВАГОН В15К

**А.С. Аникин**  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## ADAPTATION OF FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS DRIVE ON SHAFT SELF-PROPELLED CAR V15K

**A.S. Anikin**  
Chelyabinsk, SUSU

Представлены опыт внедрения, проблемы и перспективы частотно-регулируемого асинхронного электропривода в горных машинах, а именно, реализация тягового электропривода самоходного пневмоколесного вагона В15К, построенного на одном преобразователе частоты и четырех асинхронных двигателях, подключенных параллельно, без датчиков обратных связей.

*Ключевые слова:* преобразователь частоты, горный транспорт, многодвигательный электропривод, шахтный самоходный вагон В15К, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, мотор-колесо.

The article presents the adaptation experience, problems and prospects of frequency-controlled asynchronous drive on mining transport, namely implementation of tractive drive of self-propelled pneumowheel car V15K. The drive contains one frequency converter and four parallel-connected induction motors without feedback sensors.

*Keywords:* frequency converter, mining transport, multimotor drive, shaft self-propelled car V15K, squirrel-cage induction motor, hub motor.

Для угледобывающей и соледобывающей отраслей чрезвычайно актуальна задача внедрения регулируемого электропривода (ЭП) на базе преобразователя частоты (ПЧ) и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР). Это позволит обеспечить быстрое и точное регулирование усилий и скорости механизмов, а также энергосберегающие режимы, которые сейчас являются неотъемлемым требованием всех технологических процессов.

В настоящее время горные машины оснащены большим количеством ЭП:

- тяговые ЭП;
- ЭП погрузочно-разгрузочных механизмов;
- приводы подачи режущих инструментов;
- приводы режущих инструментов;
- вспомогательные механизмы и т.д.

Регулирование всех этих механизмов осуществляется, в лучшем случае, переключением обмоток двигателя, что является морально устаревшим и неэффективным техническим решением.

Принято считать, что большинство указанных механизмов не требуют глубокого регулирования скорости и усилий в электроприводе, а ПЧ – это громоздкие, ненадежные, дорогостоящие устройства, не пригодные к работе в горных машинах. Эта точка зрения в настоящее время далека от ис-

тины, но продолжает сдерживать применение регулируемых электроприводов в горных машинах.

Действительно, утверждать, что не существует технических проблем для внедрения ПЧ на горных машинах, нельзя. Именно с этими проблемами связаны неудачные попытки ряда российских и европейских предприятий внедрить частотное регулирование на горные машины, в частности, в качестве тягового ЭП на самоходные пневмоколесные вагоны. В настоящее время только американская фирма Joy Technologies Inc. поставляет на рынок вагоны с частотно-регулируемым тяговым приводом. При этом их стоимость в несколько раз превышает стоимость отечественных вагонов.

Вагон пневмоколесный самоходный грузовой В15К Копейского машиностроительного завода предназначен для транспортировки горной массы в подземных условиях шахт, опасных по газу (метану) и угольной пыли. Двухскоростные асинхронные двигатели, в которых секции обмоток статора соединяются треугольником или двойной звездой, обеспечивали передвижение вагона на двух скоростях.

ОАО «Копейский машиностроительный завод» с 2007 года проводит работы по внедрению частотно-регулируемого тягового ЭП на вновь

разрабатываемый пневмоколесный вагон. Исходные данные для установки ПЧ были следующие:

- в качестве тяговых электродвигателей применялись 4 мотор-колеса, АДКЗР мощностью 22 кВт с мягкими механическими характеристиками (критическое скольжение на уровне 60 %) и большими возможностями по перегрузке;

- необходимо обеспечить 3 скорости передвижения: 3 км/ч, 6 км/ч и 9 км/ч;

- эксплуатация вагона должна обеспечиваться на трассе с углами уклонов  $\pm 12$  градусов.

Последнее требование равносильно изменению нагрузки на тяговый привод от  $-300\%$  до  $+300\%$ .

Конструктивно, оптимальным вариантом тягового привода является ЭП на базе четырех АДКЗР (АИУЕ225М), параллельно питающихся от одного ПЧ (Vacon NXP). Такая система снижает износ механических частей (исключается прямой пуск, используется динамическое торможение вместо механического), улучшает эксплуатационные характеристики привода (энергетику, тяговые усилия).

Прикладные программы, поставляемые фирмой-изготовителем ПЧ, разработаны для общепромышленных механизмов (насосов, вентиляторов, конвейеров) и не подходят для такого специфического оборудования, как самоходный вагон. Поэтому на данном этапе из-за отсутствия программных средств приходится проектировать структуру и программное обеспечение (ПО) ЭП, исходя из других «применений» (прикладных программ), что достаточно сложно, так как фирмы производители и их представительства в России не предоставляют структуры и алгоритмы управления преобразователей, а также прав корректировать эти структуры и алгоритмы.

Получается, что напряжение  $U_{A,B,C}$  и частота  $f$  на выходе ПЧ формируются в зависимости от сигнала задания скорости  $n_s$  и измеряемых суммарного тока  $I_\Sigma$  и напряжения  $U$  преобразователя по стандартной макропрограмме и по функциональной схеме (рис. 1), не учитывающей особенностей данного электропривода.

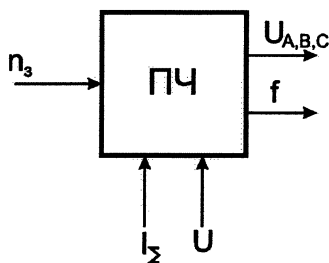


Рис. 1. Функциональная схема

Тяговый электропривод вагона должен обеспечивать работу на трех скоростях: 3, 6 и 9 км/ч. В связи с этим наиболее подходящей для управления двигателем является «Макропрограмма с набором

фиксированных скоростей». Выбран режим управления двигателя, обеспечивающий поддержание скорости. Очевидно, при этом в ПЧ происходит вычисление «усредненной» скорости двигателя.

Проведены эксперименты в заводских условиях и в условиях шахты. Результаты экспериментов фиксировались с помощью программного обеспечения к ПЧ NCDrive, которое позволяет выводить на экран до 10 параметров. Диаграммы работы вагона в условиях шахты представлены ниже.

При проведении экспериментов особое внимание уделялось следующим режимам:

- обеспечение работы привода на низких скоростях, что считается проблемой для асинхронных регулируемых электроприводов;

- обеспечение тормозных режимов при движении под уклон и при остановке;

- поддержание скорости при изменениях внешней нагрузки;

- процессы регулирования тока статора и момента;

- работа привода при максимальных нагрузках.

На рис. 2 изображено движение вагона под уклон. Торможение обеспечивается путем рассеивания энергии на тормозном резисторе. Его мощность составляет 2 кВт, но ее вполне достаточно для работы под уклон. Также активирована функция динамического торможения, которая позволяет при торможении гасить часть энергии в двигателе. Отрицательный момент формируется снижением напряжения на выходе преобразователя.

Рис. 3 иллюстрирует изменение нагрузки в широких пределах. Сначала груженный вагон (3–4 тонны) двигался по горизонтальной поверхности, момент нагрузки составлял примерно 30 % (участок I).

На участке II была включена вторая скорость, вагон разогнался, заехав на небольшое возвышение ( $1-2^\circ$ ), но затем в течение 10 с двигался под небольшой уклон (нагрузка 20 %). Потом (участок III) при угле подъема примерно 3–4 градуса момент возрастает до 70 %. На участке IV угол подъема увеличивается до 9–10 градусов (нагрузка 160 %). Затем вагон движется по горизонтальной поверхности при небольших неровностях трассы (участок V), а на участке VI происходит разгон до третьей скорости.

При работе на второй заданной скорости скольжение, соответствующее 20 % нагрузки, составляет 4,5 %, а при 160 % нагрузки – 11,5 %. За время движения ошибка по скорости не превышала 4,5 %. Кривые момента, тока и напряжения имеют колебательный характер, причем ток и напряжение повторяют форму момента.

В выбранном режиме управления (управление скоростью двигателя в разомкнутом контуре) при больших моментах нагрузки (см. рис. 3) заданная скорость поддерживается с пятипроцентной точностью. Конечно, не известна математическая модель, по которой вычисляется скорость вращения,



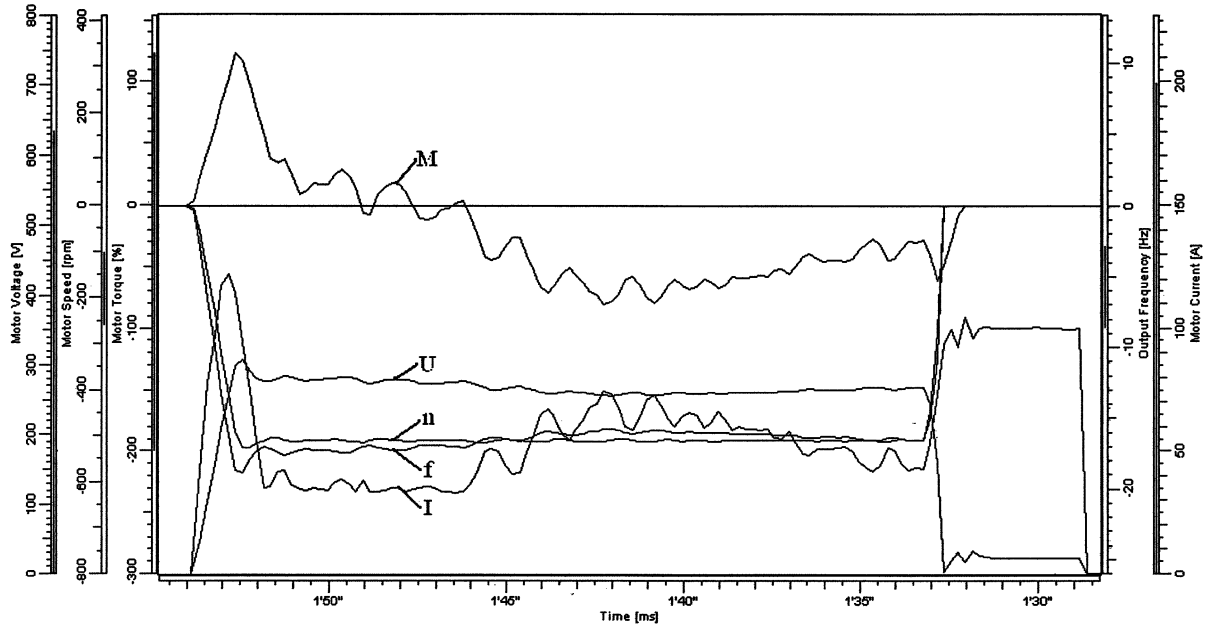


Рис. 2. Движение вагона под уклон

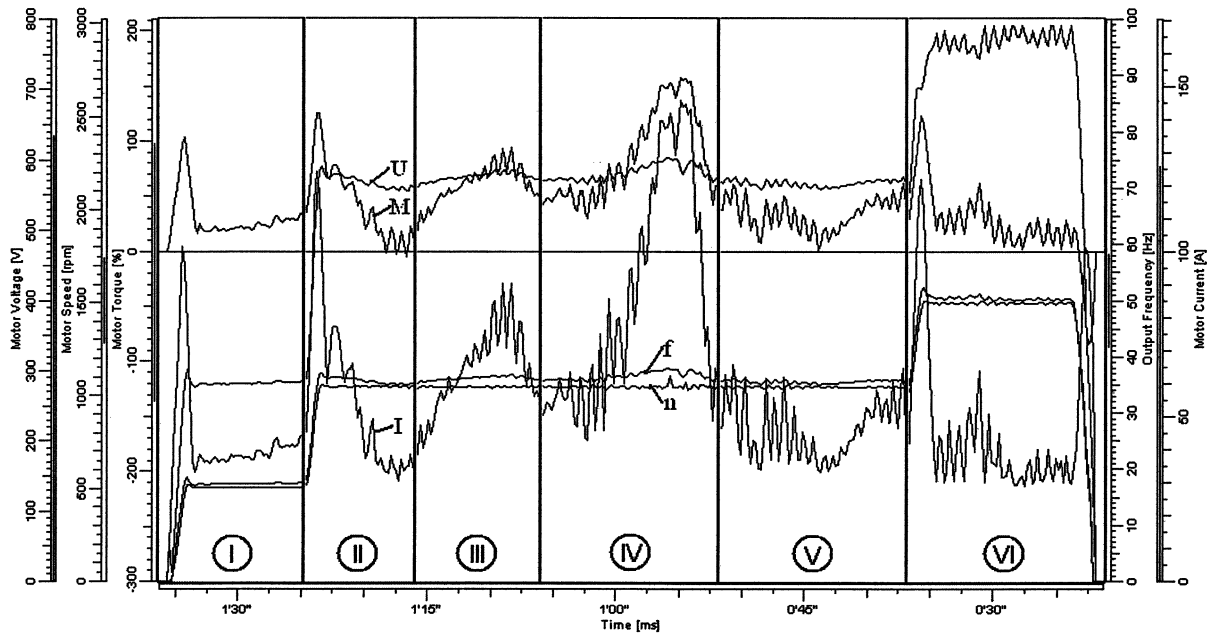


Рис. 3. Изменение нагрузки в широких пределах

да и значение ее усредненное (так как подключены четыре двигателя), но при визуальном наблюдении отклонений при работе на всех скоростях не обнаружено.

Из рис. 3 видно, что  $\Delta s=7\%$ , а  $\Delta M=140\%$ . На рис. 4 приведена механическая характеристика, соответствующая второй заданной скорости. По ней видно, что приращению момента нагрузки от 20 до 160 % соответствует изменение скольжения на 10 %. Если бы привод работал на фиксированных механических характеристиках, то при больших нагрузках скольжение бы существенно увели-

чилось, а на низких скоростях привод не смог бы работать.

Поддержание скорости двигателя, реализованное в преобразователе, при изменении нагрузки от  $-300\%$  до  $+300\%$  обеспечивает изменение скольжения не более 10–15 %, при работе двигателя на естественной характеристике, скольжение изменялось бы от  $-65\%$  до  $+65\%$ . Пропорционально скольжению изменялись бы потери в роторе, которые не контролируются, но приводят к перегреву двигателя.

# Электромеханика

По анализу результатов экспериментов были сформулированы проблемы, требующие дальнейшего решения, и перспективы, открывающиеся с внедрением асинхронного регулируемого электропривода.

1. Испытания пневмоколесного вагона в шахтных условиях показали, что применение асинхронных регулируемых электроприводов в горном машиностроении перспективно. Полученные качества привода могут быть использованы в ЭП горных машин для подачи режущих инструментов, приводов режущих инструментов, приводов погрузочных механизмов и т.д. Широкие возможности одновременного регулирования скоро-

сти и момента обеспечат высокое качество и надежность технологических процессов.

2. Внедряемый тяговый ЭП обеспечивает достаточно высокую точность (в пределах 5 %) поддержания скорости с одновременным регулированием механического момента в больших пределах (от - 300 % до + 300 %). При этом нужно учитывать, что ПЧ работает по стандартной макропрограмме и по схеме, не учитывающей особенностей данного электропривода (см. рис. 1).

3. Для оптимизации работы ПЧ предполагается создание математической модели данной системы электропривода с учетом ее особенностей (рис. 5):

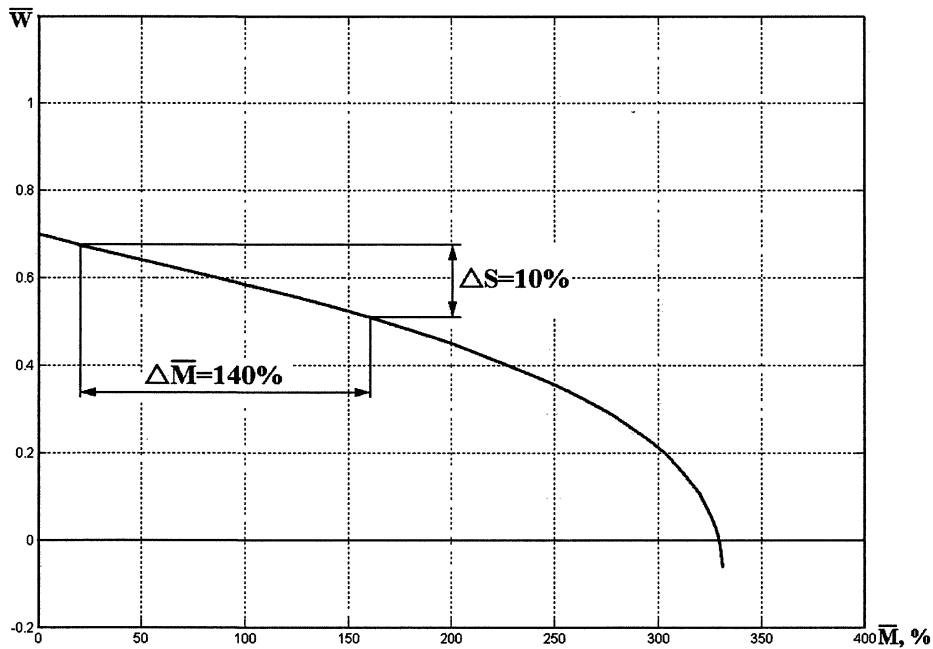


Рис. 4. Механическая характеристика, соответствующая второй заданной скорости

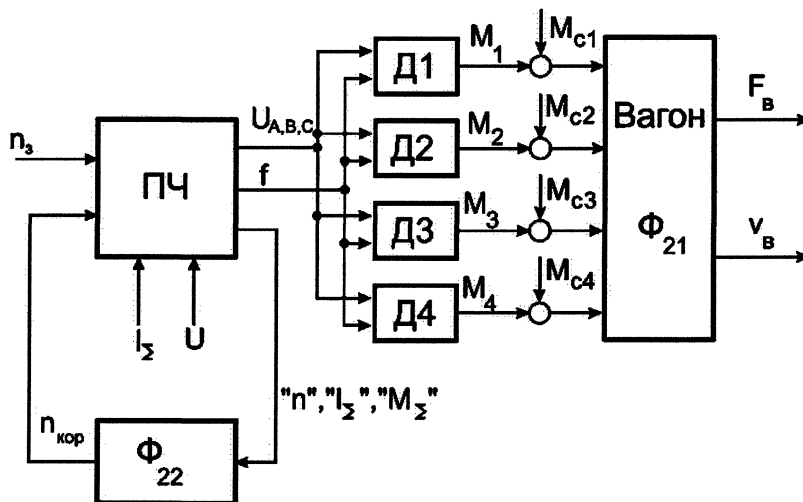


Рис. 5. Функциональная схема электропривода

- работа ПЧ на четыре двигателя, связанных общей неодинаковой нагрузкой;
- невозможность установить датчики на каждый двигатель;
- высокая динамика нагрузки и ее недетерминированность.

Исследование полученной математической модели позволит оптимизировать работу электропривода за счет определения:

- наиболее эффективного закона управления ПЧ в разных режимах;
- наиболее эффективного режима управления двигателем;
- оптимальной  $U/f$ -кривой и ее адаптации к изменению нагрузки;
- минимально необходимой мощности тормозного резистора из-за ограниченных габаритов, предоставляемых на машинах для электронного оборудования и т.д.

4. Коллектив разработчиков предполагает обратиться к фирме-изготовителю ПЧ для получе-

ния доступа к работе с «внутренними» алгоритмами работы преобразователя. В результате этого может сформироваться новая макропрограмма применения для шахтных электроприводов, внутри которой будет реализован функционал  $\Phi_{22}$ . Создание новой прикладной программы управления ПЧ для шахтных электроприводов позволит упростить наладку электроприводов горнодобывающего оборудования и самоходного вагона в частности.

5. Предусмотрена возможность реализации функционала  $\Phi_{22}$  на базе разрабатываемого дополнительного управляющего устройства, которое предназначено для обеспечения условий взрывозащищенного исполнения цепей управления электроприводами вагона. Устройство будет обрабатывать сигналы задания с пульта оператора (величину задания скорости, направление движения), сигналы, поступающие от ПЧ (« $n$ », « $I_T$ », «предупреждения», «неисправности» и т.д.) и формировать сигналы управления для преобразователя.

*Поступила в редакцию 10.01.2009 г.*

**Аникин Александр Сергеевич** – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов: силовая электроника, автоматизированный электропривод. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

**Anikin Alexander Sergeevich** – postgraduate student of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University. Scientific interests: power electronics, automated electric drive. Contact telephone: 8-(351) 267-93-21

# АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.577

## ОЦЕНКА ГРАНИЦ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

*С.Л. Елистратов*  
*г. Новосибирск, ИТ СО РАН*

## THE ESTIMATE OF THE LIMITS OF TECHNICAL AND ECONOMICAL EFFICIENCY OF HEAT PUMP APPLICATION

*S.L. Elistratov*  
*Novosibirsk, IT SB RAS*

Представлена методика определения технико-экономической эффективности тепловых насосов парокомпрессионного и абсорбционного типов в сравнении с электродкотлами и топливными котельными.

*Ключевые слова:* тепловой насос, экономическая эффективность, инвестиционный проект.

A simple method for determination of technical and economical efficiency of vapor-compression and absorption heat pumps is shown in comparison with electric boilers and fuel boiler houses.

*Keywords:* heat pump, economical efficiency, project investment.

Практическое замещение с помощью тепловых насосов (ТН) ископаемых видов топлива на низкопотенциальное (до 40 °С) тепло возобновляемых и вторичных источников: воды рек, озер, питьевой воды, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, систем оборотного водоснабжения, окружающего воздуха, грунта и т. п. источников, – является важным направлением энергосбережения и охраны окружающей природной среды.

Для принятия решения об использовании ТН полезными могут быть предварительные оценки границ их технико-экономической эффективности. Ниже изложена простая методика поэтапного определения экономической эффективности, неразрывно связанная с энергетическими, экологическими и другими показателями работы ТН и теплоисточников на их основе.

Целью первого этапа оценки является установление самых общих граничных показателей целесообразности применения ТН на основе наглядного графического представления (рис. 1) уравнения для чистого дисконтированного дохода [1]:

$$\text{ЧДД} = B \frac{1 - (1 + E)^{-T}}{E} - K_0, \quad (1)$$

где  $K_0$  – единовременные капитальные затраты;  $B$  – ежегодные чистые сбережения, получаемые благодаря ТН;  $T$  – технический срок службы оборудования;  $E$  – ежегодная норма дисконта.

При ЧДД = 0 уравнение (1) дает семейство граничных кривых, представляющих внутреннюю норму доходности ВНД. Область параметров экономически эффективного применения ТН будет располагаться под соответствующими кривыми (см. рис. 1). Например, параметры т. А на верхней кривой имеют значения:  $T = 20$ ,  $\text{ВНД} = 0,288$  и  $K_0/B = 3,4$ . Для области под этой кривой (см. т. С, D и F) ЧДД > 0 и проекты применения ТН будут приносить доход, а выше нее (см. т. В и S) ЧДД < 0, что свидетельствует об их убыточности. В области ЧДД > 0 при неизменном отношении  $K_0/B$  с целью обеспечения безубыточности проекта при  $T_F < T_D < T_A$  необходимо уменьшать допустимую норму дисконта  $E$  с уменьшением срока службы  $T$ . При этом безразмерный комплекс  $K_0/B$  характеризует допустимый предельный уровень отношения капиталовложений и годовой чистой прибыли (без налогов и амортизации) для рассматриваемого варианта применения ТН.

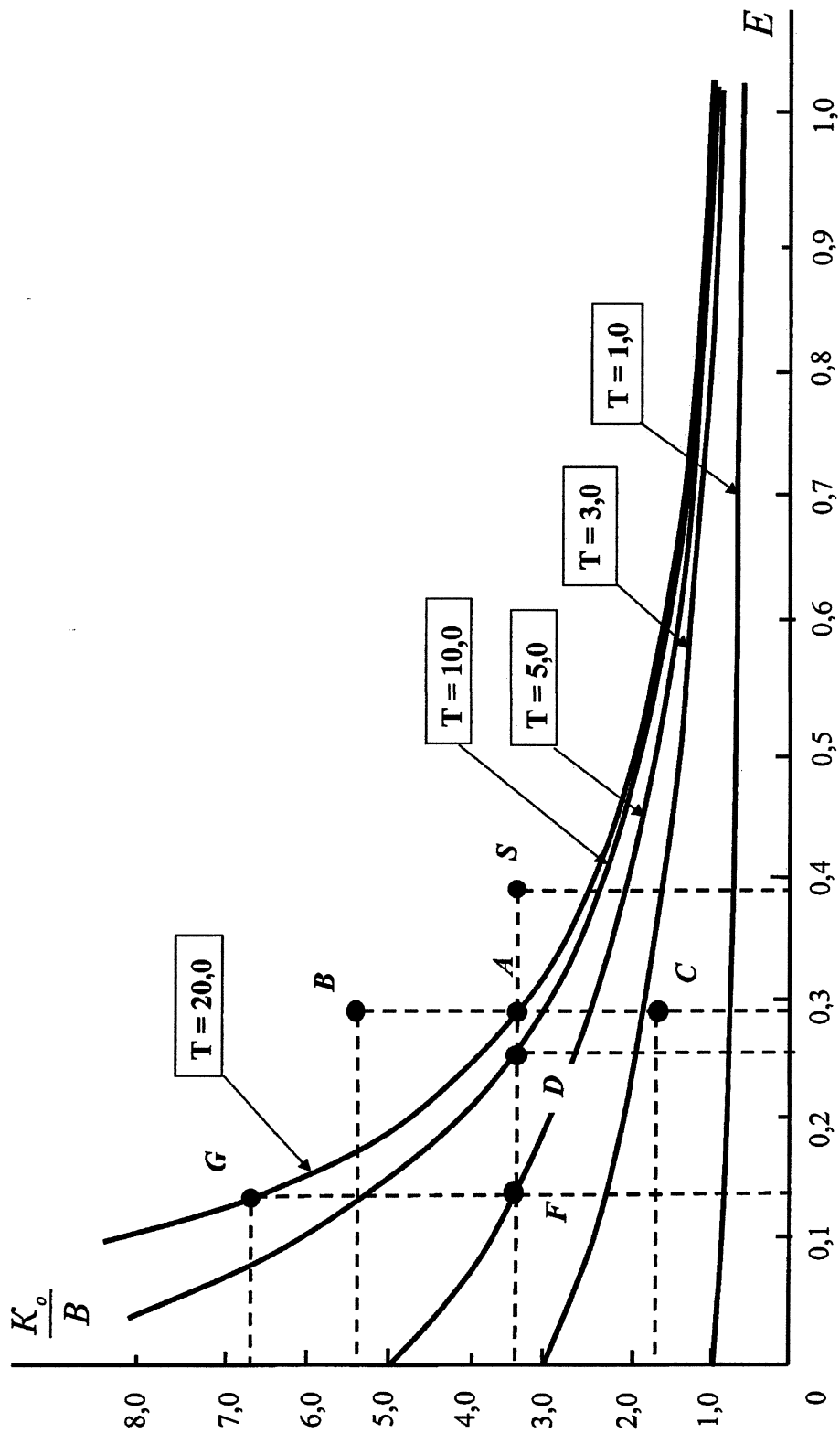


Рис. 1. Граничные значения экономической эффективности инвестиционных проектов применения ТН

## Альтернативные источники энергии

На втором этапе для выявления допустимых границ отпускной цены на продукцию, производимую ТН, воспользуемся возможностями непрерывной модели денежных потоков [2]. Переход от дискретных потоков, характерных для большинства работающих систем теплоснабжения, к непрерывным позволяет представить любой денежный поток в виде

$$Z = \int_0^T e^{-r\tau} dZ(\tau), \quad (2)$$

где  $T$  и  $\tau$  – соответственно полный период и текущее время осуществления проекта,  $r$  – непрерывная норма дисконта. Связь между годовой и непрерывной нормами дисконта определяется простым уравнением:

$$1 + E = e^r. \quad (3)$$

Из (3) следует, что  $r < E$ , но если  $E$  невелика, то разница между ними незначительна.

Аналитическая формула [2] для расчета интегрального эффекта инвестиционного проекта производства, отпускающего в непрерывном режиме потребителю продукцию  $Q$  по цене  $P$  при годовых эксплуатационных издержках  $C$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = & [PQ - C](1 - \eta_{\Pi}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - \\ & - K_{\text{Н}} \left[ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu \right] - K \left\{ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu + \right. \\ & \left. + \eta_{\text{И}}(1 - \eta_{\text{И}}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{\Pi} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}. \quad (4) \end{aligned}$$

Здесь  $K$  и  $K_{\text{Н}}$  – соответственно капитализируемые и некапитализируемые инвестиции в проект, равномерно производимые в предпусковой период продолжительностью  $S$ ;  $T$  – продолжительность эксплуатации объекта;  $\nu$ ,  $\eta_{\Pi}$  и  $\eta_{\text{И}}$  – соответственно ставки налогов на добавленную стоимость, прибыль и имущество. В пределах временного отрезка осуществления инвестиционного проекта  $-S \leq \tau \leq T$  значение  $= 0$  соответствует завершению инвестиций и началу производства продукции. В момент начала эксплуатации осуществляется единовременный возврат НДС и до завершения проекта начинает осуществляться налогообложение прибыли и капитализированного имущества.

Применительно к проектам применения ТН различного типа выражение (4) можно представить как

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = & [(Q_{\text{T}} P_{\text{T}} + Q_{\text{X}} P_{\text{X}} + \Psi P_{\text{CO}_2}) - \\ & - \sum_{k=1}^m I_k](1 - \eta_{\Pi}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - K_{\text{P}} \left[ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu \right] - \\ & - (K_{\text{ЗД}} + K_{\text{ОБ}}) \left\{ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu + \right. \\ & \left. + \eta_{\text{И}}(1 - \eta_{\Pi}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{\Pi} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь  $K_{\text{ЗД}}$  – капитальные затраты на строительство зданий и сооружений для размещения ТН;  $K_{\text{ОБ}}$  – капитальные вложения в приобретение оборудования ТН и технические системы для обеспечения их работы;  $K_{\text{P}}$  – некапитализируемые затраты, связанные с работами по проектированию, монтажными, пуско-наладочными и т. п. работами до ввода ТН в эксплуатацию.

В качестве возможных доходов от использования ТН в (5) учтены: тепловая энергия  $Q_{\text{T}}$ , отпускаемая по цене  $P_{\text{T}}$ ; одновременно с тепловой энергией вырабатываемый холод для кондиционирования или охлаждения технологических потоков  $Q_{\text{X}}$ , отпускаемый по цене  $P_{\text{X}}$ ; специфический экологический товар [3] – квоты на выбросы углекислого газа  $\Psi$ , продажа которых может быть произведена на международном рынке по цене  $P_{\text{CO}_2}$ .

Годовые эксплуатационные затраты в (5) можно представить в виде суммы равномерно распределенных затрат:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m I_k = & I_{\text{Э}} + I_{\text{А}} + (I_{\text{ТР}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{О}} + I_{\text{ПРОЧ.}}) + \\ & + I_{\text{ОС}} + I_{\text{Н}} + I_{\text{КР}}. \quad (6) \end{aligned}$$

Здесь  $I_{\text{Э}}$  – энергетические затраты (приобретение топлива, высокопотенциального тепла и/или электроэнергии);  $I_{\text{А}} = (k_{\text{А}}^{\text{ЗД}} \cdot K_{\text{ЗД}} + k_{\text{А}}^{\text{ОБ}} \cdot K_{\text{ОБ}})$  – амортизационные отчисления;  $I_{\text{ТР}} = k_{\text{ТР}} I_{\text{А}}$  – отчисления на текущий ремонт;  $I_{\text{ЗП}} = 12z\Phi(1 + \beta)$  – годовые отчисления на зарплату обслуживающего персонала;  $I_{\text{О}} = k_{\text{О}}(I_{\text{А}} + I_{\text{ТР}} + I_{\text{ЗП}})$  – расходы на содержание инфраструктуры;  $I_{\text{ПРОЧ.}} = k_{\text{ПРОЧ.}} I_{\text{О}}$  – прочие непредвиденные расходы;  $I_{\text{ОС}}$  – издержки на охрану окружающей среды, в том числе плата за вредные выбросы и сбросы;  $I_{\text{Н}}$  – издержки на повышение надежности работы теплоисточника;  $I_{\text{КР}}$  – плата за кредит;  $z$  – количество обслуживающего персонала;  $\Phi$  – среднемесячная зарплата одного работающего;  $k_{\text{А}}$ ,  $k_{\text{ТР}}$ ,  $k_{\text{О}}$ ,  $k_{\text{ПРОЧ.}}$ ,  $\beta$  – соответственно безразмерные коэффициенты амортизационных отчислений на реновацию и капитальный ремонт, текущий ремонт, на содержание инфраструктуры теплового хозяйства, прочих неучтенных расходов, норматив отчислений в социальные фонды.

Упростим задачу, приняв во внимание в (5) в качестве единственного вида полезного дохода средства от продажи тепловой энергии, а в качестве затрат только энергозатраты. Годовую выработку тепловой энергии теплоисточником можно представить как

$$Q = Q^{\text{P}} k_{\text{ГОД}}, \quad (7)$$

где  $Q^P$  – расчетная паспортная теплопроизводительность оборудования;  $k_{год}$  – коэффициент годовой загрузки его установленной мощности, характеризующий конкретный эксплуатационный режим работы.

Тогда для наиболее распространенных на практике парокompрессионных с электроприводом и абсорбционных ТН выражение (5) с учетом (7) преобразуется соответственно к виду:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = & Q^P \tau_{год} k_{год} [P_T - T_{эл} / \varphi] (1 - \eta_{II}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - \\ & - K_P \left[ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu \right] - \\ & - (K_{зд} + K_{об}) \left\{ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu + \right. \\ & \left. + \eta_{II} (1 - \eta_{II}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{II} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = & Q^P \tau_{год} k_{год} [P_T - T_T / (\mu \eta_{ГЕН})] \times - \\ & \times (1 - \eta_{II}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - K_P \left[ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu \right] - \\ & - (K_{зд} + K_{об}) \left\{ (1 + \nu) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - \nu + \right. \\ & \left. + \eta_{II} (1 - \eta_{II}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{II} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $\varphi$  и  $\mu$  – коэффициенты преобразования и трансформации соответственно для парокompрессионных и абсорбционных ТН;  $\eta_{ГЕН}$  – КПД генератора абсорбционного ТН;  $T_{эл}$  и  $Q_T$  – соответственно цены на электроэнергию для электропривода и на высокопотенциальное тепло для генератора абсорбционного ТН.

При ЧДД = 0 выражения (8) и (9) позволяют определить граничные значения отпускных цен на производимую тепловую энергию. В качестве примера рассмотрим ТН с  $Q^P = 1,0$  МВт при работе в составе системы отопления при продолжительности отопительного периода 5500 ч, для которой, следуя рекомендациям работы [4], примем  $k_{год} = 0,32$ . Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3 для следующих фиксированных значений параметров:  $K_{об} = 5000,0$  тыс. руб.;  $K_{зд} = 1000,0$  тыс. руб.;  $K_P = 1000,0$  тыс. руб.;  $S = 1,0$  год;  $T = 20$  лет,  $\nu = 0,18$ ;  $\eta_{II} = 0,24$ ;  $\eta_{II} = 0,022$ . Значения других параметров указаны на рисунках.

Точки пересечения кривых с осью ЧДД=0 определяют предельные отпускные цены  $P_T^{min}$  на тепловую энергию. При  $P_T > P_T^{min}$  применение ТН экономически эффективно, так как ЧДД > 0, и наоборот, отпуск тепловой энергии по цене  $P_T < P_T^{min}$  становится убыточным. Относительному увеличению значений  $P_T^{min}$  способствуют увеличение нормы прибыли  $r$ , действующих тарифов  $T_{эл}$  и  $Q_T$ , а также снижение сроков  $T$  технической эксплуатации ТН. С увеличением загрузки оборудования, т.е. с ростом параметра  $k_{год}$ , происходит относительное снижение  $P_T^{min}$  и увеличение эффективности вложения инвестиций. Учет в формуле (5) значений  $(Q_X P_X)$  и  $(\Psi \cdot P_{CO_2})$ , а также снижение капитальных затрат  $K_{об}$ ,  $K_{зд}$  и  $K_P$  также уменьшают  $P_T^{min}$ . Учет других эксплуатационных затрат в (6), напротив приводит к росту  $P_T^{min}$ .

На основе анализа выражений (8) и (9), а также зависимостей на рис. 2 и 3 можно сделать вывод о том, что увеличение показателей энергетической эффективности  $\varphi$  и  $\mu$  способно привести к значительному снижению  $P_T^{min}$ , а следовательно к повышению конкурентоспособности теплонасосных технологий. При выполнении предельного условия безубыточности ЧДД = 0 и неизменных первоначальных капитальных затратах это приводит к увеличению соотношения  $K/B$  и/или снижению норм дисконта  $r$  и  $E$ . На рис. 1 эта тенденция при неизменном значении срока службы  $T$  соответствует увеличению текущих значений  $K_0/B$  с уменьшением значений годовой нормы дисконта  $E$ . Принимая  $K_0 = K_{зд} + K_{об} + K_P$  и  $r \cong E$  можно показать, что т. G ( $K_0/B \cong 0,66$ ;  $E \cong 0,13$ ) на рис. 1 соответствует значению  $P_T^{min} = 1040$  руб./Гкал, тогда как т. A ( $K_0/B \cong 3,4$ ;  $E \cong 0,29$ ) соответствует относительно более высокое значение  $P_T^{min} = 1740$  руб./Гкал. Таким образом, с увеличением энергетической эффективности ТН, т.е. с увеличением  $\varphi$  и  $\mu$  уменьшается относительное влияние капиталовложений в инвестиционные проекты применения ТН.

На третьем этапе целесообразно выполнить оценки сравнительной эффективности. Аналогично вышеизложенному могут быть произведены оценки эффективности традиционных технологий производства тепловой энергии:

– для топливных (газовых, угольных, мазутных и т.п.) котлов по уравнению:

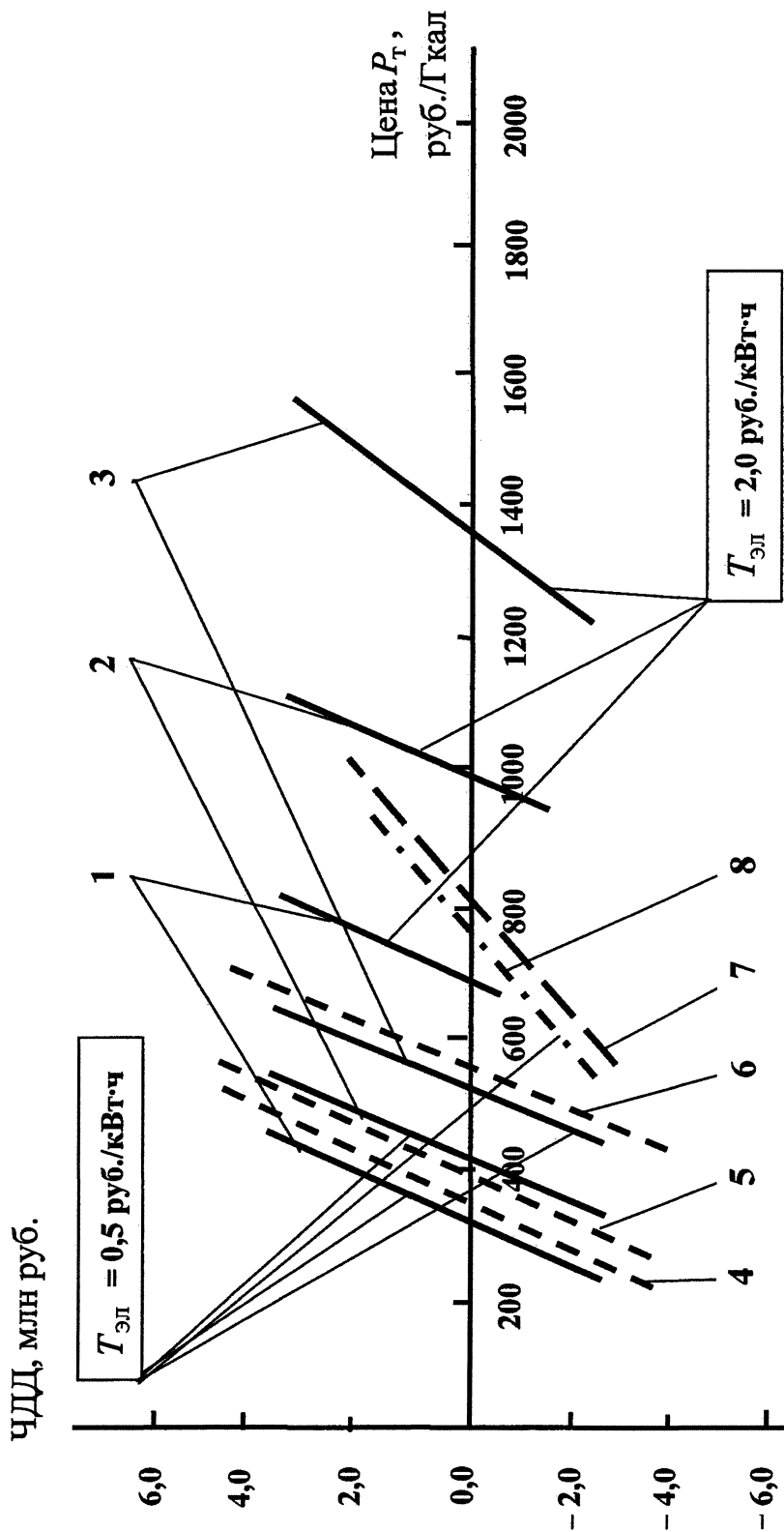


Рис. 2. Предельные значения отпускной цены на тепловую энергию для  $r = 0,02$ .

Парокомпрессионный ТН с электроприводом: 1 –  $\varphi = 5,0$ ; 2 –  $\varphi = 3,0$ ; 3 –  $\varphi = 2,0$ ;  
 абсорбционный ТН ( $\eta_{ген} = 0,8$  и  $\mu = 2,2$ ): 4 –  $T_T = 284$  руб./Гкал (природный газ),  
 5 –  $T_T = 370$  руб./Гкал (пар от ТЭЦ), 6 –  $T_T = 690$  руб./Гкал (пар от угольной котельной);  
 7 – угольная котельная ( $T = 7$  лет,  $\eta_K = 0,5$ ,  $U_T = 2,5$  т. руб./Г.у.т.,  $K_{об} = 1200$  т. руб./МВт,  $K_{зд} = 0$ ,  $K_r = 240$  т. руб.);  
 8 – электрокотел ( $T = 7$  лет,  $\eta_{эл.к} = 0,95$ ,  $K_{об} = 1960$  т. руб./МВт,  $K_{зд} = 0$ ,  $K_r = 390$  т. руб.)



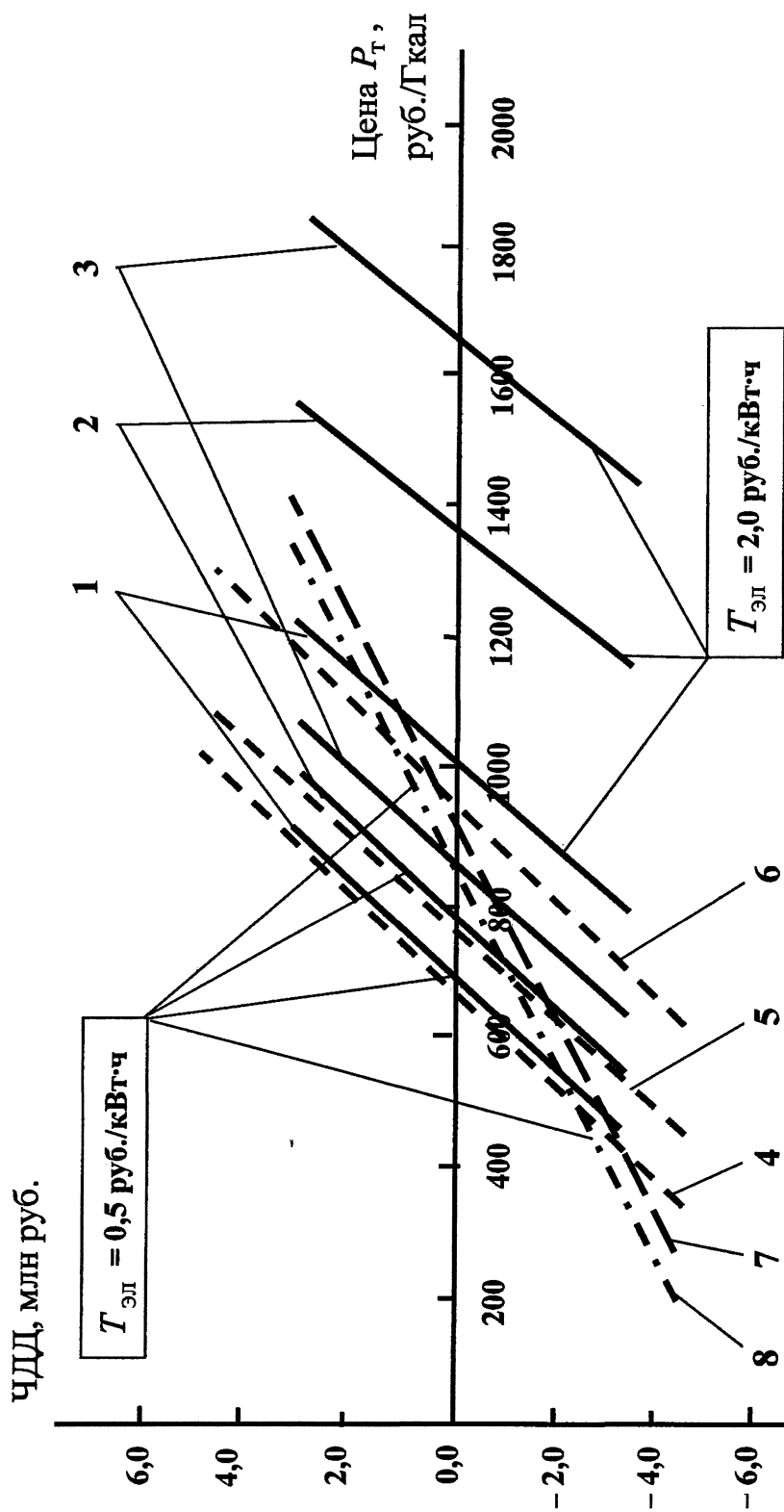


Рис. 3. Предельные значения отпускной цены на тепловую энергию для  $r = 0,13$ .

Парокомпрессионный ТН с электроприводом: 1 –  $\varphi = 5,0$ ; 2 –  $\varphi = 3,0$ ; 3 –  $\varphi = 2,0$ ;  
 абсорбционный ТН ( $\eta_{ген} = 0,8$  и  $\mu = 2,2$ ): 4 –  $T_T = 370 \text{ руб./Гкал}$  (пар от ТЭЦ),  
 5 –  $T_T = 284 \text{ руб./Гкал}$  (природный газ), 6 –  $T_T = 690 \text{ руб./Гкал}$  (пар от угольной котельной);  
 7 – угольная котельная ( $T = 7 \text{ лет}$ ,  $\tau_{ж} = 0,5$ ,  $C_T = 2,5 \text{ т. руб./г.у.т.}$ ,  $K_{об} = 1200 \text{ т. руб./МВт}$ ,  $K_{зд} = 0$ ,  $K_P = 240 \text{ т. руб.}$ );  
 8 – электрокотел ( $T = 7 \text{ лет}$ ,  $\tau_{эл.к} = 0,95$ ,  $K_{об} = 1960 \text{ т. руб./МВт}$ ,  $K_{зд} = 0$ ,  $K_P = 390 \text{ т. руб.}$ )

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = Q^P \tau_{\text{год}} k_{\text{год}} [P_T - C_T R / \eta_K] \times \\ \times (1 - \eta_{\text{П}}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - K_P \left[ (1 + v) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - v \right] - \\ - (K_{\text{Зд}} + K_{\text{Об}}) \left\{ (1 + v) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - v + \right. \\ \left. + \eta_{\text{И}} (1 - \eta_{\text{П}}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{\text{П}} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}; \end{aligned} \quad (10)$$

– для электрокотлов согласно:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = Q^P \cdot \tau_{\text{год}} \cdot k_{\text{год}} [P_T - T_{\text{ЭЛ}} / \eta_{\text{ЭЛ.К}}] \times \\ \times (1 - \eta_{\text{П}}) \frac{1 - e^{-rT}}{r} - K_P \cdot \left[ (1 + v) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - v \right] - \\ - (K_{\text{Зд}} + K_{\text{Об}}) \left\{ (1 + v) \frac{e^{rS} - 1}{rS} - v + \right. \\ \left. + \eta_{\text{И}} (1 - \eta_{\text{П}}) \frac{e^{-rT} - 1 + rT}{r^2 T} - \eta_{\text{П}} \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $\eta_K$  и  $\eta_{\text{ЭЛ.К}}$  – соответственно КПД топливных котлов и электрокотлов;  $C_T$  – цена условного топлива;  $R = 0,1428$  т у.т./Гкал.

Согласно зарубежным и отечественным данным [5, 6] средний технический срок службы ТН составляет 15...20 лет. Для котельного оборудования, несмотря на его относительно меньшую по сравнению с ТН стоимость, необходимо учитывать более короткий по сравнению с ТН технический срок службы, официально ограниченный нормативными сроками ( $T = 7...10$  лет) амортизации [7] и несоблюдением на практике паспортных режимов эксплуатации и сервисного обслуживания. Сокращение сроков эксплуатации приводит (см. рис. 1) к уменьшению области экономически эффективных параметров работы. Для малых угольных котельных в сельской местности, для которых  $\eta_K \leq 0,5$ , а доставка топлива сопряжена с высокими транспортными расходами, значения

$P_T^{\text{min}}$  при низких тарифах на электроэнергию могут быть выше не только по отношению к ТН (см. рис. 2 и 3), но и к электрокотельным установкам. Например, такая ситуация характерна для коммунального хозяйства Иркутской области, где на долю электрокотельных приходится почти 10 % вырабатываемой тепловой энергии, а тарифы на электроэнергию традиционно являются одними из самых низких в России.

Таким образом, следуя вышеизложенной поэтапной схеме можно на стадии предварительных оценок с учетом требуемого уровня конкретизации широкого спектра технических, энергетических, режимных, экономических и экологических параметров определить сравнительную эффективность проектов применения теплонасосных технологий.

## Литература

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / под ред. В.В. Косова, В.Н. Лившица, А.Г. Шахназарова. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.
2. Виленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк. – М.: Дело, 2002. – 888 с.
3. Елистратов, С.Л. Экологические аспекты применения парокомпрессионных тепловых насосов / С.Л. Елистратов, В.Е. Накоряков // Известия РАН. Энергетика. – 2007. – № 4 – С. 76–83.
4. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.
5. Antonio Briganti. Тепловые насосы в жилых помещениях // АВОК. – 2001. – № 6. – С. 32–38.
6. Абсорбционные преобразователи теплоты / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 338 с.
7. Все об амортизации основных средств: пособие по практическому применению «Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» / под ред. С.В. Белоусовой. – М.: Вершина, 2006. – 176 с.

Поступила в редакцию 10.04.2009 г.

**Елистратов Сергей Львович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории процессов переноса Учреждения Российской академии наук. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ИТ СО РАН), г. Новосибирск. Область научных интересов: тепловые насосы и энергосбережение.

Контактный телефон: 8-(383) 335-65-77.

**Elistratov Sergey Lvovich** – Candidate of technical sciences, senior scientific employee of Laboratory of transfer processes of Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IT SB RAS). The field of scientific interests is heat pumps and energy saving.

Contact telephone: 8-(383) 335-65-77.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ**

1. В редакцию предоставляется печатный вариант статьи и ее электронная версия (документ Microsoft Word), экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати, сведения об авторах (Ф.И.О., место работы, звание и должность, контактная информация (адрес, телефон, e-mail)).

2. Один автор может опубликовать в одном сборнике не более двух статей.

3. Структура статьи: УДК, название, список авторов, аннотация (не более 500 знаков), список ключевых слов, текст работы, литература (ГОСТ 7.1-2003). На отдельной странице приводятся название, аннотация, список ключевых слов и сведения об авторах на английском языке.

4. Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее – 23, нижнее – 23, левое – 22, правое – 25 мм. Шрифт – Times New Roman, кегль – 14. Отступ красной строки 0,7 см, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – полуторный. Рисунки и схемы должны быть сгруппированы и иметь названия.

5. Адрес редакции научного журнала «Вестник ЮУрГУ» серии «Энергетика»: Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, ауд. 256, Энергетический факультет. Ответственный редактор Хохлов Ю.И., тел. (351) 267-90-83, e-mail: Khokhlov@energo.susu.ac.ru, зам. отв. редактора Булатов Б.Г., (351) 267-92-41, e-mail: bbg@susu.ac.ru.

6. Полную версию правил подготовки рукописей и пример оформления можно загрузить с сайта ЮУрГУ (<http://www.susu.ac.ru>) следуя ссылкой: «Научные исследования», «Издательская деятельность», «Вестник ЮУрГУ», «Серии».

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

### **ВЕСТНИК ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**№ 15(148) 2009**

**Серия  
«ЭНЕРГЕТИКА»  
Выпуск 11**

Редактор Н.М. Лезина  
Компьютерная верстка В.Г. Харитоновой

**Издательский центр Южно-Уральского государственного университета**

---

Подписано в печать 21.04.09. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 9,69. Тираж 500 экз. Заказ 123/171.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.