

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

# ИЗВЕСТИЯ

## ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 324, № 4, 2014

Техника и технологии  
в энергетике

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Пестряков А.Н., гл. редактор, д-р хим. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)  
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)

### Ресурсы Планеты

Савичев О.Г., редактор серии, д-р географ. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)

### Математика, физика и механика

Никитенков Н.Н., редактор серии, д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., канд. физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Рожкова С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)

### Химия и химические технологии

Коршунов А.В., редактор серии, д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)

### Техника и технологии в энергетике

Заворин А.С., редактор серии, д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc. (Нидерланды)  
Кабов О.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Маренго М., PhD (Италия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)

### Информационные технологии

Кочегуров А.И., редактор серии, канд. техн. наук (Россия)  
Хамкер Ф.Х., Dsc (Германия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)

### Социально-гуманитарные технологии

Барышева Г.А., редактор серии, д-р экон. наук (Россия)  
Завадскас Э.К., PhD, Dsc (Литва)  
Касати Ф., PhD (Италия)  
Грюнвальд А., PhD (Германия)  
Бутовская М.Л., д-р ист. наук (Россия)  
Головаха Е.И., д-р филос. наук (Украина)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) – рецензируемый мультидисциплинарный журнал, предназначенный для ученых, исследующих специфику развития техники и технологии в различных научных сферах.

Журнал издается с 1903 года. Учредителем является Томский политехнический университет. Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2012 – 0,174

Особое внимание в журнале уделяется ключевым проблемам развития современной техники и технологии, что выражается в тематических разделах журнала, охватывающих следующие аспекты науки и техники:

- Ресурсы Планеты
- Математика, физика и механика
- Химия и химические технологии
- Техника и технологии в энергетике
- Информационные технологии
- Социально-гуманитарные технологии

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Не принимаются литературные обзоры, комментарии, рецензии и т. д.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

К публикации в серию «Техника и технологии в энергетике» принимаются оригинальные содержания статьи с теоретическими и экспериментальными результатами, связанными с решением фундаментальных и прикладных проблем, а также их инженерным обеспечением в энергетике и энергетическом машиностроении, по следующим основным направлениям: теплофизические и электрофизические процессы в технологиях генерации, трансфера, распределения и использования энергии; свойства топлив, конструкционных, тепло-и электроизоляционных материалов и изделий; их физико-химические преобразования под воздействием факторов энергетических технологий; основное и вспомогательное оборудование электростанций; энергетические системы и комплексы; электрические машины и аппараты; оборудование и системы промышленной и малой распределенной энергетики; традиционные и возобновляемые источники энергии; автоматизация и математическое моделирование технологических процессов энергетики; мониторинг, прогнозирование и защита окружающей среды в зоне ответственности предприятий энергетики. Приоритетными для серии журнала являются статьи, посвященные инновационным разработкам и исследованиям в области ресурсосбережения и энергоэффективности.

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 1684-8519

# BULLETIN

## OF TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Volume 324, № 4, 2014

### Power Engineering

TPU  PUBLISHING

Tomsk

# BULLETIN OF TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

## EDITORIAL BOARD

Pestryakov A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

### The Planet Resources

Savichev O.G., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.Eh., Dr. Sc. (Russia)  
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)

### Mathematics, Physics and Mechanics

Nikitenkov N.N., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., Cand. Sc. (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenkov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Rozhkova S.V., Dr. Sc. (Russia)

### Chemistry and Chemical Technology

Korshunov A.V., *section editor*, Cand. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)

### Power Engineering

Zavorin A.S., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc. (Netherlands)  
Kabov O.A., Dr. Sc. (Russia)  
Marengo M., PhD (Italy)  
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)

### IT Technologies

Kochegurov A.I., *section editor*, Cand. Sc. (Russia)  
Hamker F.H., Dsc (Germany)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)

### Humanities and Social Sciences Technologies

Barysheva G.A., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Zavadskas E.K., PhD, DSc (Lithuania)  
Casati F., PhD (Italy)  
Grunwald A., PhD (Germany)  
Butovskaya M.L., Dr. Sc. (Russia)  
Golovakha E.I., Dr. Sc. (Ukraine)

## AIMS AND SCOPES

Bulletin of Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed multidisciplinary journal owned by Tomsk Polytechnic University. The Journal focuses on the key problems of the development of modern technologies and engineering.

The journal was founded in 1903. The journal is on open access on [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) and nationally (Certificate PE № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

Topical sections of the Journal focuses on the following aspect of science and engineering:

- The Planet Resources
- Mathematics, Physics and Mechanics
- Chemistry and Chemical Technology
- Power Engineering
- IT Technologies
- Humanities and Social Sciences Technologies

TPU Bulletin publishes only original research articles. It does not accept literature reviews, case reports, commentaries etc. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

The Bulletin of Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

*Power Engineering.* The journal publishes only original research articles containing theoretical and experimental results associated with solution of fundamental and applied problems, engineering support in power engineering and power engineering industry in the following key subdisciplines: thermophysical and electrophysical processes in energy generation, transfer, distribution and use; properties of fuels, engineering thermal and electric insulating materials and products; their physicochemical transformation under energy technology factors; main and auxiliary equipment of power plants; power systems and complexes; electrical machinery and apparatus; equipment and systems of industrial and small-scale power generation; conventional and renewable energy sources; automation and mathematical simulation of power engineering process; monitoring, forecasting and protection of environment within the area of responsibility of power engineering enterprises. The articles devoted to innovations in the field of resource conservation and energy efficiency are of higher priority for the Journal.



## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Волновое течение испаряющейся пленки жидкости** 6  
Актершев С.П., Алексеенко С.В.
- Тепловая защита чердачного перекрытия многоквартирного жилого здания с нетиповой кровлей при проведении капитального ремонта** 15  
Анисимов М.В.
- Расчет распределения температуры в стержне при переменном коэффициенте теплоотдачи на его поверхности** 22  
Видин Ю.В., Казаков Р.В.
- Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания** 25  
Саломатов В.В.
- Роторно-винтовые двигатели** 38  
Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырёв М.Е.
- Теплотехнические характеристики углей месторождения Шивэ-Овоо Монголии как энергетического топлива** 47  
Заворин А.С., Долгих А.Ю., Саломатов В.В., Батмунх С., Энхжаргал Х.
- Когенерационная энергоустановка с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения** 54  
Казаков А.В., Заворин А.С., Новосельцев П.Ю., Табакаев Р.Б.

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Исследование двухключевого обратного преобразователя в источниках питания для осветительных светодиодов** 62  
Гинтинг Р., Иванов А.В., Семенов С.М.
- Модальное управление асинхронным электроприводом** 69  
Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А.
- Исследование трехфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей** 76  
Горбунов Р.Л., Посконный Г.И.
- Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода** 87  
Пустоветов М.Ю.
- Двухфазный повышающий преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов и особенности его динамических свойств** 96  
Диксон Р.К., Дементьев Ю.Н., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Семёнов С.М.
- Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока** 102  
Осипов А.В., Шиняков Ю.А., Отто А.И., Черная М.М., Ткаченко А.А.
- Разработка компьютерной модели расчета количественной оценки эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса** 110  
Михайлов И.Ю., Муравлев О.П., Федянин А.Л.
- Размыкатель силовых цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой** 117  
Пустынников С.В., Хохлова Т.Е.
- Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем** 123  
Прохоров А.В., Васильев А.С., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А.
- Система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии** 133  
Встовский А.Л., Федий К.С., Архипцев М.Г., Спириин Е.А.
- Двухкоординатная система наведения солнечных батарей на Солнце** 139  
Аржанов К.В.

### HEAT POWER ENGINEERING

- Wave flow of the evaporating liquid film** 6  
Aktershev S.P., Alekseenko S.V.
- Thermal protection shield of attic floor when repairing multi-apartment building with nonstandard roofing system** 15  
Anisimov M.V.
- Calculation of heat distribution in rod with variable heat irradiation coefficient on its surface** 22  
Vidin Yu.V., Kazakov R.V.
- Scientific foundations of development and low-cost reconstruction of coal steam generators for vortex combustion technology** 25  
Salomatov V.V.
- Rotary screw engines** 38  
Puzyrev E.M., Golubev V.A., Puzyrev M.E.
- Combustion characteristics of Shiwei-Ovoo coal deposits in Mongolia for energy consumption** 47  
Zavorin A.S., Dolgikh A.Yu., Salomatov V.V., Batmunkh S., Enkhzhargal Kh.
- The cogeneration power plant with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic material for off-line power supply** 54  
Kazakov A.V., Zavorin A.S., Novoseltsev P.Yu., Tabakaev R.B.

### ELECTRIC POWER ENGINEERING

- Research of two-switch flyback converter as a second stage of a LED driver** 62  
Ginting R., Ivanov A.V., Semenov S.M.
- Modal control of asynchronous electric drive** 69  
Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A.
- Investigation of three-phase AC voltage converter, used for increasing energy efficiency of induction motors** 76  
Gorbunov R.L., Poskonny G.I.
- Experience in developing sine-wave filter for power circuit of VVVF-drive with induction motor** 87  
Pustovetov M.Yu.
- Dynamic properties of a two-phase boost converter with soft-switching transistors technology** 96  
Dixon R.C., Dementyev Yu.N., Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G., Semenov S.M.
- Power supply systems of spacecraft based on adjustable current inverters** 102  
Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M., Tkachenko A.A.
- Development of computer model for calculating quantitative assessment of traction electric motor trolleybus reliability** 110  
Mikhaylov I.Yu., Muravlev O.P., Fedyanin A.L.
- A breaker of high current DC circuits with inductive load** 117  
Pustynnikov S.V., Khokhlova T.E.
- Development of hybrid models of high voltage direct current systems for comprehensive analysis of large power systems** 123  
Prokhorov A.V., Vasilev A.S., Ruban N.Yu., Ufa R.A.
- Asynchronous generator control system for renewable energy sources** 133  
Vstovskiy A.L., Fediy K.S., Arkhitektsev M.G., Spirin E.A.
- Two-coordinate system of pointing solar batteries to the sun** 139  
Arzhanov K.V.

# Теплоэнергетика

УДК 536. 24.01

## ВОЛНОВОЕ ТЕЧЕНИЕ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

**Актершев Сергей Петрович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотр. Института теплофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.  
E-mail: sergey-aktershev@mail.ru

**Алексеенко Сергей Владимирович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корр. РАН, директор Института  
теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.  
E-mail: aleks@itp.nsc.ru

*Численным методом исследованы волнообразование и теплоперенос в ламинарной стекающей пленке жидкости при наличии испарения. Для описания нелинейных волн в жидкой пленке применена интегральная модель, модифицированная с учетом фазового превращения. Проведено численное моделирование волновых режимов течения неизотермической пленки при наличии испарения на межфазной поверхности. Показано, что на поверхности испаряющейся пленки развиваются естественные волны, обусловленные неустойчивостью течения. Впервые изучена эволюция возбужденных волн в испаряющейся пленке в широком частотном диапазоне. Показано, что возбужденные волны начинают развиваться на значительно меньшем расстоянии, чем естественные. Амплитуда развитых волн падает с увеличением расстояния. Интенсификация теплопереноса волнами происходит в основном из-за уменьшения толщины пленки между пиками. Локальное число Нуссельта определяется длиной участка между пиками, которая возрастает в процессе взаимодействия и слияния отдельных пиков. Показано, что в определенном диапазоне частоты возбуждения волны существенно интенсифицируют теплоперенос по сравнению с естественными волнами.*

### **Ключевые слова:**

*Пленка жидкости, испарение, нелинейные волны, теплоперенос, численное моделирование.*

### **Введение**

Течения тонкой пленки жидкости реализуются в различных технологических процессах и присутствуют в технологических установках различного назначения, таких как испарители, конденсаторы, абсорберы, дистилляционные колонны и т. п. В большинстве практически важных случаев течение пленки неустойчиво и на поверхности жидкости развиваются волны. Известно, что даже при ламинарном течении наличие волн на поверхности пленки существенно интенсифицирует теплоперенос. Так, в работах [1–4] были экспериментально измерены коэффициенты теплоотдачи в процессах испарения и конденсации для ламинарно-волнового режима течения. Результаты измерений на 40...80 % превышают теоретическое значение для гладкой пленки, что объясняется влиянием волн на поверхности жидкости. Теоретический подход к исследованию волн в изотермических

пленках, предложенный в работах [5, 6], был использован в работе [7] для выведения модельных уравнений, описывающих эволюцию длинноволновых нелинейных возмущений в пленке. Гидродинамика двумерных волновых режимов течения изотермических пленок в настоящее время исследована достаточно полно; результаты этих исследований представлены и обобщены в монографиях [8, 9]. Гораздо в меньшей степени изучены нелинейные волны в неизотермических пленках. В работах [10–15], посвященных исследованию устойчивости пленки с фазовым переходом, было показано, что поток массы на межфазной поверхности существенно влияет на устойчивость течения, причем конденсация оказывает стабилизирующее воздействие, а испарение дестабилизирует течение. В [16, 17] для описания волнового течения пленки конденсата применена модель [7], модифицированная с учетом фазового превращения. Были по-

лучены дисперсионные зависимости, кривые нейтральной устойчивости и характеристики волн максимального роста.

Анализ устойчивости проводится, как правило, на основе временного подхода исходя из локальных параметров течения – числа Рейнольдса  $Re = gh^3/3\nu^2$  и безразмерного волнового числа  $k = 2\pi h/l_{wave}$  (здесь  $h$  – толщина пленки,  $l_{wave}$  – длина волны). Результаты анализа [11, 15] показали, что в случае испарения пленочное течение неустойчиво для всех чисел Рейнольдса при  $0 < k < k_n$ . Значение нейтрального волнового числа  $k_n$  зависит от параметра  $\varepsilon = c_p \Delta T / (r \cdot Pr)$ , характеризующего интенсивность испарения, и растет с увеличением  $\varepsilon$ . Здесь  $\Delta T = T_w - T_s$  – температурный напор,  $c_p$  – теплоемкость,  $r$  – теплота испарения,  $Pr$  – число Прандтля. Для типичных условий течения в технологических аппаратах параметр  $\varepsilon \ll 1$ .

Проблемы гидродинамики и теплопереноса волновых течений пленок достаточно сложны и остаются мало изученными как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Численному моделированию теплопереноса при волновом течении пленки посвящено сравнительно небольшое число работ, и почти все исследования проводились для пленки без фазового превращения. Так, в [18–22] численными методами решалась система уравнений Навье–Стокса, уравнения неразрывности и уравнения энергии. В этих исследованиях расчеты проведены только для некоторых жидкостей и значений числа Рейнольдса. В [23] проведено систематическое исследование влияния параметров течения на интенсификацию теплопереноса волнами. Интенсификация теплопереноса волнами объясняется двумя факторами – утонением пленки между гребнями волн и конвективным переносом в зоне циркуляции, которая появляется для волн большой амплитуды [20, 23, 24]. В работах [18, 21], посвященных численному моделированию ламинарного течения пленки конденсата R11, наблюдались естественные волны, которые появляются при достаточно больших числах Рейнольдса. В работах [25, 26] численным методом исследована динамика нелинейных волн в пленке воды при наличии конденсации на межфазной поверхности. Было показано, что в пленке конденсата развиваются естественные волны, обусловленные неустойчивостью течения, которые существенно интенсифицируют теплоперенос. Впервые было проведено моделирование возбужденных волн и показано, что за счет периодического воздействия в определенном диапазоне частот можно интенсифицировать теплоперенос.

В настоящее время в литературе отсутствует систематическое исследование волновых режимов течения жидкой пленки при наличии испарения. Цель данной работы – методом математического моделирования изучить динамику волн в испаряющейся пленке жидкости и их влияние на теплоперенос.

### Уравнения нестационарного течения пленки при наличии испарения

Рассмотрим течение ламинарной неизотермической пленки жидкости на вертикальной пластине. Введем декартову систему координат  $Oxy$  так, что ось  $Ox$  направлена вниз, а ось  $Oy$  перпендикулярна пластине (рис. 1), и примем следующие общепринятые упрощения, правомерные для широкого диапазона практически важных условий течения.

- 1) Температура пластины  $T_w = \text{const}$ ; поверхность жидкости контактирует с неподвижным насыщенным паром, температура которого равна  $T_s = \text{const}$ .
- 2) Пленка жидкости вносит основной вклад в термическое сопротивление.
- 3) Вкладом реактивной силы, обусловленной фазовым переходом, в нормальное напряжение на межфазной поверхности пренебрегаем.
- 4) Возмущение поверхности пленки считаем длинноволновым (характерная длина возмущения  $l_{wave}$  много больше толщины пленки  $h$ ).
- 5) Плотность  $\rho$ , динамическую вязкость  $\mu$ , теплопроводность  $\lambda$  жидкости, поверхностное натяжение  $\sigma$ , теплоту испарения  $r$  считаем постоянными.

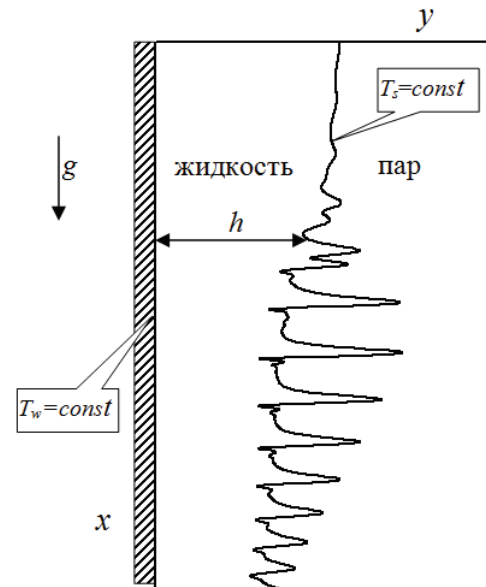


Рис. 1. Схема волнового течения испаряющейся пленки жидкости

Наличие испарения приводит к появлению на поверхности пленки потока массы  $j = -(\lambda/r) \partial T / \partial y|_{y=h}$  и касательного напряжения  $\tau_s = -j u_s$ , где  $u_s$  – скорость жидкости на поверхности пленки. С учетом сделанных упрощений в [16, 17] выведена система уравнений для толщины пленки  $h$  и расхода  $q = \int_0^h u dy$ , которая описывает нестационарное течение жидкости в пленке. В случае вертикальной пленки эти уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{6F_0 q^2}{5h} \right) = gh - \frac{vF_1 q}{h^2} + \frac{h\sigma}{\rho} \frac{\partial^3 h}{\partial x^3}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{j}{\rho}. \quad (2)$$

При выводе уравнений (1), (2) профиль скорости в пленке задавался в виде полинома второй степени, удовлетворяющего граничным условиям на стенке и на поверхности пленки:

$$u/u_s = (2+A)\eta - (1+A)\eta^2.$$

Здесь  $\eta = y/h$  – безразмерная координата,  $A = -\tau_s h / \mu \omega_s = jh / \mu$ ,  $F_0 = 1 - A / (4+A)^2$  и  $F_1 = 1 + A / (4+A)$  – коэффициенты, учитывающие влияние испарения на профиль скорости. При отсутствии фазового превращения уравнения (1), (2) переходят в интегральную модель [7] с автомодельным параболическим профилем скорости.

Теплоперенос в пленке описывается уравнением энергии, которое в погранслоном приближении имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}.$$

В этом уравнении удобнее перейти к переменным  $(x, \eta, t)$ , тогда поверхность пленки  $y = h(x, t)$  переходит в стационарную границу  $\eta = 1$ . При таком переходе уравнение энергии принимает вид [23]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{W}{h} \frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{a}{h^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2}.$$

Здесь  $W = v + \eta \left( -\frac{\partial h}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial x} \right)$ . Подставляя сюда  $\partial h / \partial t$  из (2), а также продольную скорость  $u = \frac{3q((2+A)\eta - (1+A)\eta^2)}{2h(1+A/4)}$  и поперечную скорость

$$v = -h \int_0^{\partial u} d\eta, \text{ получаем}$$

$$W = \left( \eta - \frac{3\eta^2}{2} + \frac{\eta^3}{2} \right) \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{3}{2} (\eta^2 - \eta^3) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Aq}{4+A} \right) - \eta \frac{j}{\rho}.$$

Введем линейный масштаб  $l$  по оси  $Ox$ , сопоставимый с длиной волны в пленке, а в качестве линейного масштаба по оси  $Oy$  возьмем толщину пленки  $h_m$  при  $x=0$ . Введем масштаб скорости  $u_m = gh_m^2 / 3\nu$ , масштаб времени  $t_m = l / u_m$ , масштаб расхода  $q_m = u_m h_m$ , масштаб температуры  $\Delta T = T_w - T_s$  и перейдем к безразмерным переменным  $x/l$ ,  $y/h_m$ ,  $h/h_m$ ,  $q/q_m$ ,  $t/t_m$ ,  $u/u_m$ , сохраняя для них прежние обозначения. В безразмерных переменных течение пленки описывается системой из трех уравнений для толщины пленки  $h(x, t)$ , расхода  $q(x, t)$  и температуры  $\theta(x, \eta, t) = (T_w - T) / \Delta T$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{6F_0 q^2}{5h} \right) = \frac{3}{\chi \text{Re}_m} \left( h - \frac{F_1 q}{h^2} \right) + \chi^2 \text{We} h \frac{\partial^3 h}{\partial x^3},$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{A}{\chi \text{Re}_m h},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{W}{h} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \frac{1}{\chi \text{Re}_m \text{Pr} h^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}. \quad (3)$$

Здесь  $A = \varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1}$ ;  $\varepsilon = c_p \Delta T / (r \cdot \text{Pr})$  – интенсив-

ность испарения;  $\text{We} = (3Fi / \text{Re}_m^5)^{1/3}$ ;  $\text{Re}_m = gh_m^3 / 3\nu^2$  – число Рейнольдса на входе;  $\chi = h_m / l$  – отношение линейных масштабов;  $Fi = \sigma^3 / \rho^3 g \nu^4$  – число Капицы;

$$W = \left( \eta - \frac{3\eta^2}{2} + \frac{\eta^3}{2} \right) \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{3}{2} (\eta^2 - \eta^3) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{qA}{4+A} \right) - \frac{A\eta}{\chi \text{Re}_m h}.$$

Граничные условия для уравнения энергии будут

$$\theta \Big|_{\eta=1} = 1, \quad \theta \Big|_{\eta=0} = 0.$$

Для стационарного течения (без волн) эффектом поверхностного натяжения можно пренебречь. В этом случае два первых уравнения (3) примут вид

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{6F_0 q^2}{5h} \right) = \frac{3}{\chi \text{Re}_m} \left( h - \frac{F_1 q}{h^2} \right),$$

$$\frac{dq}{dx} = -\frac{A}{\chi \text{Re}_m h}. \quad (4)$$

Если принять линейный профиль температуры  $\theta = \eta$  (т. е.  $A = \varepsilon$ ), то решениями уравнений (4) будут:

$$h_{\text{steady}} = \left( 1 - \frac{4\varepsilon (F_1 + 2F_0\varepsilon/3)x}{3\chi \text{Re}_m} \right)^{1/4}, \quad (5)$$

$$q_{\text{steady}} = \frac{h^3}{F_1 + 2F_0\varepsilon/3}. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) учитывают конвективные члены в уравнении импульса посредством коэффициентов  $F_0, F_1$ . Для большинства жидкостей и типичных условий течения параметр  $\varepsilon \ll 1$ , поэтому коэффициенты  $F_0, F_1$  близки к единице. Из (5) видно, что толщина пленки монотонно падает с увеличением координаты  $x$ ; пленка полностью испаряется на расстоянии (в размерном виде)

$$x_* = 3 \text{Re}_m h_m / 4\varepsilon. \quad (7)$$

Локальный тепловой поток на пластине характеризуют коэффициентом теплоотдачи  $\alpha = (\lambda/h) \partial \theta / \partial \eta \Big|_{\eta=0}$ . В приближении линейного профиля температуры имеем  $\alpha = \lambda/h(x)$ . Обычно тепловой поток определяют посредством безразмерного числа Нуссельта  $Nu = \alpha l_v / \lambda$ , где  $l_v$  – характерный масштаб. Если взять в качестве линейного масштаба величину  $l_v = (\nu^2/g)^{1/3}$ , получим  $Nu = \alpha (\nu^2/g)^{1/3} / \lambda = (\nu^2/g)^{1/3} / h$ . Выразив здесь толщину пленки через локальное число Рейнольдса, получаем критериальную зависимость  $Nu(\text{Re})$  для гладкой пленки:



$$Nu = 1 / (3 Re)^{1/3}. \quad (8)$$

Волновые режимы течения испаряющейся пленки получены численным решением уравнений (3) конечноразностным методом. Алгоритм численного решения подробно описан в [25]. Об установлении волнового режима свидетельствовал тот факт, что для любого значения координаты расход и толщина пленки периодически зависят от времени.

**Граничные условия.** Возбужденные волны генерировались малым возмущением расхода на входе:  $q(0, t) = q_0(1 + Q_a \sin 2\pi ft)$ . Здесь  $q_0$  – невозмущенный расход,  $Q_a$  – малая амплитуда,  $f$  – заданная частота колебаний расхода. На входе задавались постоянная толщина пленки  $h(0, t) = 1$  и линейный профиль температуры  $\theta(0, \eta, t) = \eta$ . На выходе никаких специальных условий не задавалось, т. к. численная схема позволяла вычислять искомые функции  $h, q, \theta$ .

**Начальные условия.** В начальный момент времени на участке счета задавался линейный профиль температуры  $\theta(x, \eta, 0) = \eta$ ; распределения  $h(x, 0)$  и  $q(x, 0)$  задавались формулами (5), (6).

**Тепловой поток на пластине.** Для расчета теплопередачи от жидкости к изотермической пластине вычислялось среднее по времени локальное число Нуссельта

$$\langle Nu_x \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t Nu(x, t) dt,$$

$$\text{где } Nu(x, t) = \frac{1}{(3 Re_m)^{1/3}} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0}.$$

Одновременно вычислялось среднее по времени локальное число Рейнольдса, которое характеризует расход жидкости в пленке:

$$\langle Re_x \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t Re(x, t) dt,$$

$$\text{где } Re(x, t) = q(x, t) Re_m.$$

### Результаты расчетов

Все расчеты проведены для воды при температуре 373 К ( $Pr = 1,75$ ,  $Fi^{1/3} = 14700$ ) при  $Re_m = 40$ ,  $\varepsilon = 0,005$ , что соответствует температурному напору  $\Delta T = 4,7$  К. Указанные значения параметров течения по порядку величины типичны для большинства технологических устройств. В качестве масштаба по оси  $Ox$  взята величина  $l = 10^{-2}$  м; длина участка счета составляла 0,4 м, что составляет 2/3 расстояния (7), на котором пленка полностью испаряется.

**Естественные волны.** При отсутствии возмущений на входе в испаряющейся пленке развиваются естественные волны. Использование начального условия (5), (6), в котором не учитывается эффект поверхностного натяжения, эквивалентно заданию начального возмущения. Величина этого возмущения становится существенной при малой тол-

щине пленки, т. е. на достаточно большом расстоянии от входа. Это начальное возмущение пленочного течения приводит к развитию нерегулярных волн, обусловленных неустойчивостью пленки. На расстоянии 0,25–0,28 м от входа малые возмущения поверхности быстро развиваются в нелинейные волны большой амплитуды, имеющие характерный вид пика с крутым передним склоном; среднее расстояние между пиками составляет 0,8 см. Такие естественным образом появляющиеся волны наблюдались в работах [18, 21, 25] при численном моделировании течения ламинарной пленки конденсата. Эволюция естественных волн по прошествии значительного времени с момента начала счета показана на рис. 2, на котором можно проследить перемещение отдельных пиков и их взаимодействие.

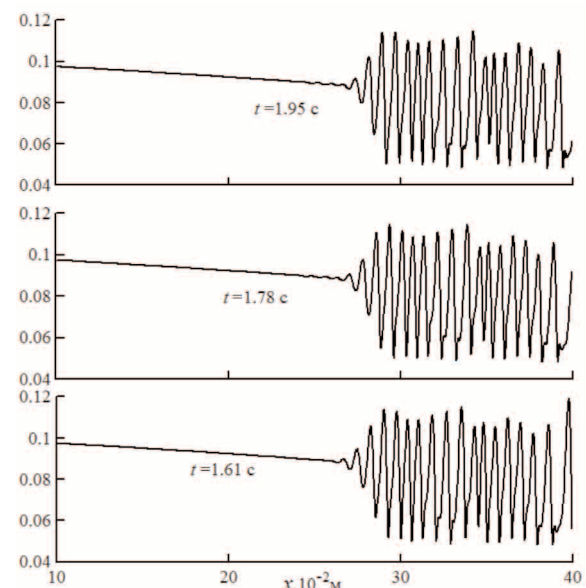


Рис. 2. Развитие естественных волн в испаряющейся пленке ( $Re_m = 40$ ;  $\varepsilon = 0,005$ ). Время указано с момента начала счета

На рис. 3 показана зависимость локального расхода от времени при  $x = 0,35$  м.

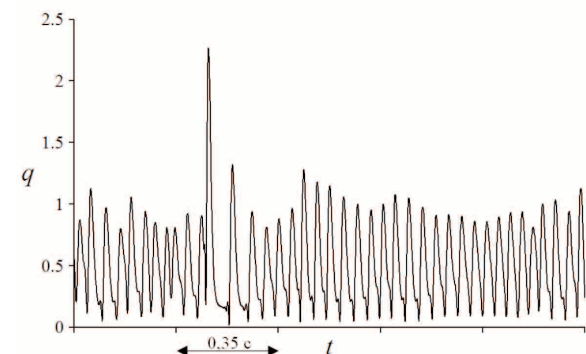


Рис. 3. Естественные волны. Зависимость локального расхода  $q(t)$  при  $x = 0,35$  м

Из рисунка видно, что высота пиков меняется во времени нерегулярным образом. Также видно, что из-за различия в скорости распространения

происходит слияние отдельных пиков. В результате появляются отдельные пики с амплитудой значительно больше, чем среднее значение.

**Возбужденные волны.** Возбужденные волны генерировались при амплитуде пульсации расхода на входе  $Q_a=0,01$ ; время счета выбиралось достаточно большим, чтобы волновой режим успел установиться на всем участке счета.

На рис. 4 показана волновая поверхность пленки для частоты 18 Гц.

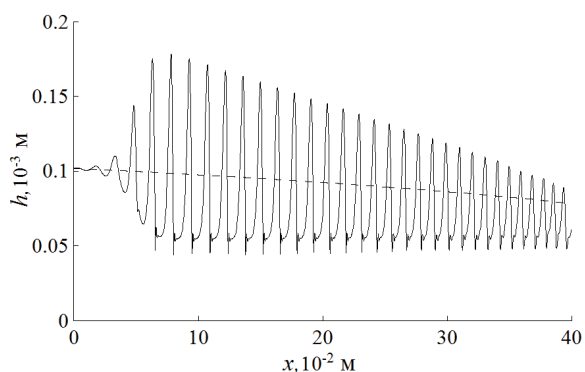


Рис. 4. Возбужденные волны;  $f=18$  Гц; штриховой линией показана невозмущенная толщина пленки

Возбужденные волны имеют регулярный характер и развиваются значительно раньше, чем естественные – на расстоянии  $0,03-0,06$  м от входа, что составляет 4–5 длины волны. Как видно из рисунка, амплитуда развитых волн в испаряющейся пленке плавно уменьшается с расстоянием, в отличие от пленки конденсата, для которой амплитуда возбужденных волн нарастала вниз по потоку [25]. Временной период  $1/f$  соответствует расстоянию между соседними пиками. Отметим, что термин «длина волны» в данной ситуации довольно условен. Поскольку толщина невозмущенной пленки уменьшается с расстоянием, здесь нет строгой пространственной периодичности волны. Так, например, для частоты 18 Гц пространственный интервал между пиками плавно уменьшается от 1,5 см на входе до 0,9 см на расстоянии 0,4 м в соответствии с уменьшением скорости движения пиков.

На рис. 5 показана поверхность пленки для более низкой частоты 10 Гц.

Здесь, в отличие от 18 Гц, наблюдается пространственная нерегулярность: между высокими пиками расположены дополнительные более низкие пики. «Длина волны», показанная на рис. 5 отрезком со стрелками, соответствует не одному интервалу между пиками, а двум таким интервалам. Появление дополнительных пиков при низких частотах возбуждения отмечалось в [27] для пленки постоянной толщины и объясняется быстрым ростом высших гармоник в спектре нелинейных колебаний. Эффект формирования дополнительных пиков при низких частотах наблюдается также для пленки с конденсацией [25]. На рисунке видно, что в результате взаимодействия соседних пиков на некотором расстоянии от входа

происходит поглощение промежуточных пиков более высокими основными пиками.

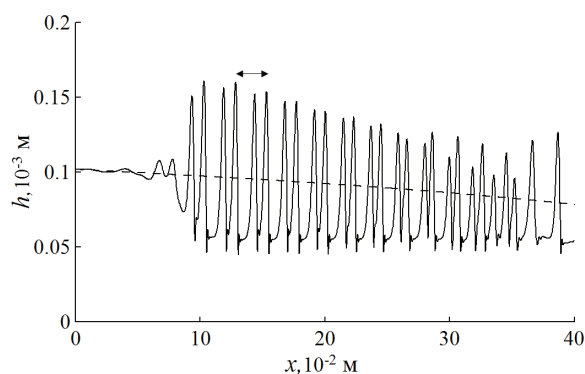


Рис. 5. Возбужденные волны;  $f=10$  Гц. Отрезком со стрелками показана длина волны, соответствующая частоте 10 Гц; штриховой линией показана невозмущенная толщина пленки

Для частоты 10 Гц периодическая зависимость  $q(t)$  при двух значениях координаты показана на рис. 6.

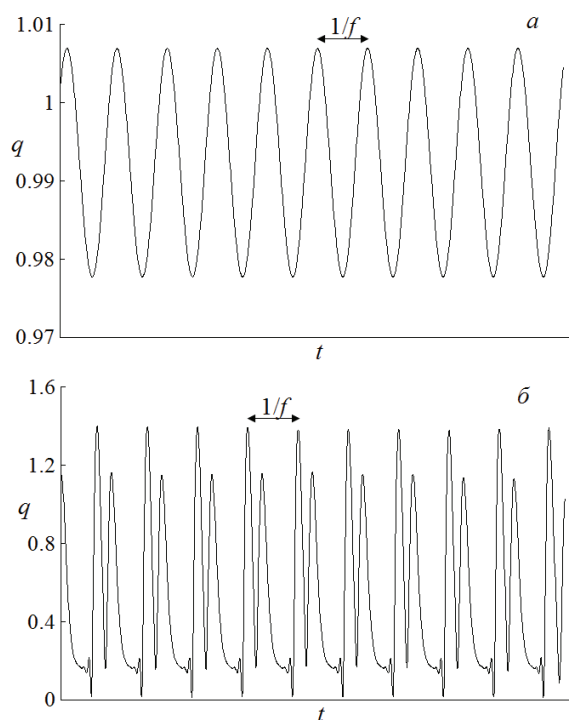
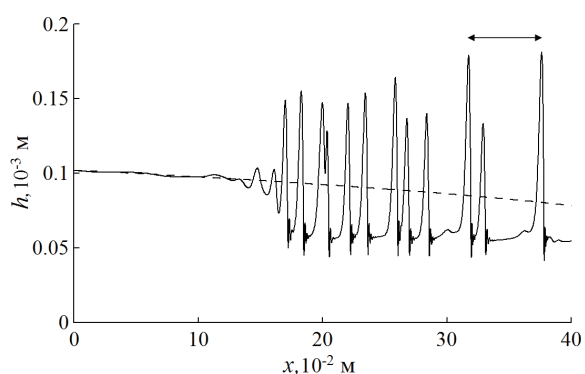


Рис. 6. Зависимость  $q(t)$  при  $f=10$  Гц для значений  $x$ : а) 0,01; б) 0,30 м. Отрезком со стрелками показан период

Из рисунка видно, что на небольшом расстоянии от входа, где амплитуда волн мала, колебания мало отличаются от синусоиды (рис. 6, а). В зоне развитых волн зависимость  $q(t)$  имеет другой вид: на каждом периоде волны появляется промежуточный пик несколько меньшей амплитуды (рис. 6, б). Быстрый рост высших гармоник на участке развития нелинейных волн имеет место для всех частот, существенно меньших, чем 18 Гц.

На рис. 7 показана волновая поверхность пленки для частоты 5 Гц.



**Рис. 7.** Возбужденные волны;  $f=5$  Гц. Отрезком со стрелками показана длина волны, соответствующая частоте 5 Гц; штриховой линией показана невозмущенная толщина пленки

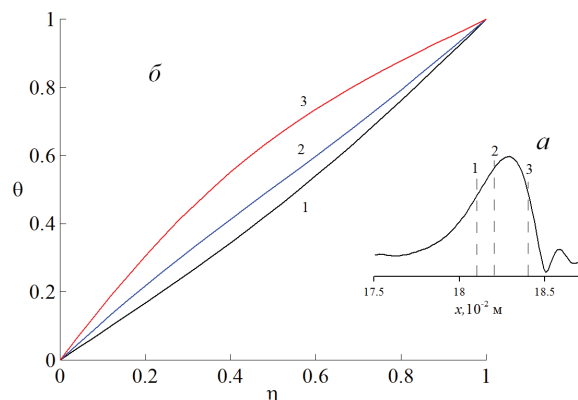
Здесь промежуточные пики так же, как на рис. 5, появляются уже на линейной стадии одновременно с основными пиками. На интервале в одну «длину волны» формируются два дополнительных пика. В отличие от частоты 10 Гц, поглощение промежуточных пиков начинается значительно раньше: видно слияние соседних пиков при  $x=0,20$  м. В результате поглощения промежуточных пиков амплитуда основных пиков заметно растет.

В целом для пленки с испарением наблюдаются те же особенности эволюции возбужденных волн, что и для пленки с конденсацией. При частоте, сопоставимой с частотой естественных волн, реализуется квазиустановившийся волновой режим с монотонно и плавно меняющейся амплитудой вниз по потоку. При частоте существенно меньшей, чем частота естественных волн, уже на линейной стадии формируются более низкие промежуточные пики. Высокие пики движутся быстрее, чем низкие, и «поглощают» их при взаимодействии, вследствие чего интервалы между пиками возрастают. В отличие от случая конденсации, амплитуда волн в испаряющейся пленке уменьшается с расстоянием, а толщина остаточного слоя несколько возрастает вниз по течению.

#### Влияние волн на теплоперенос

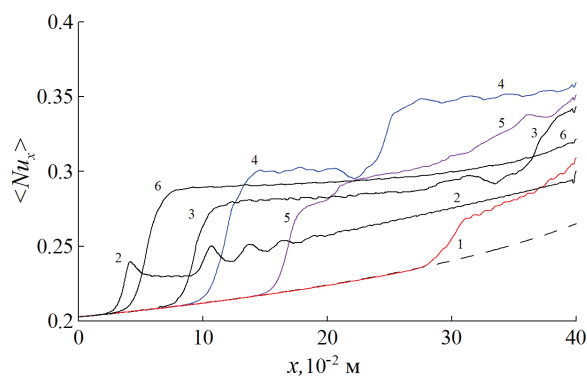
На рис. 8 для частоты 5 Гц показаны профили температуры в различных сечениях на один момент времени.

Из рисунка видно, что профиль температуры меняется в соответствии с фазой колебания и заметно отличается от линейного профиля. Это свидетельствует о заметном конвективном вкладе в теплоперенос. Наибольший конвективный вклад дает относительно узкая зона циркуляции, которая развивается вблизи максимума волны большой амплитуды [19, 23–25]. Вместе с тем, основной вклад в интенсификацию теплопереноса волнами дает участок между пиками (как и в случае конденсации), поскольку там толщина пленки минимальна, а протяженность этого участка существенно больше, чем протяженность пика.



**Рис. 8.** Форма волны частотой 5 Гц (а); штриховыми линиями 1–3 показаны сечения, для которых приведены профили температуры (б)

На рис. 9 приведены зависимости среднего по времени локального числа Нуссельта от координаты для различных значений частоты.



**Рис. 9.** Зависимость локального числа Нуссельта от координаты для различных значений частоты: 1) естественные волны; 2) 30; 3) 10; 4) 8; 5) 5; 6) 18 Гц; штриховая линия – теоретическое значение для гладкой пленки

На участке гладкой пленки расчет совпадает с теоретической зависимостью (8), а на участке развития нелинейных волн значение  $\langle Nu_x \rangle$  скачкообразно возрастает. Из рисунка видно, что координата, при которой начинается развитие нелинейных волн, зависит от частоты, но во всех случаях возбужденные волны развиваются значительно раньше, чем естественные. Анализ профилей  $h(x)$  показал, что величина  $\langle Nu_x \rangle$  определяется в основном протяженностью участка между пиками. Так, например, для кривой 4 в зоне уже развитых волн наблюдается второе скачкообразное увеличение значения  $\langle Nu_x \rangle$  при  $x \approx 0,23$  м. Это объясняется тем, что для частоты 8 Гц все промежуточные пики на расстоянии 0,23 м поглотились основными пиками, в результате чего интервал между пиками скачкообразно увеличился. Для частоты 10 Гц поглощение промежуточных пиков происходит при  $x \approx 0,36$  м, что также приводит к скачкообразному росту  $\langle Nu_x \rangle$ . Для частоты более 15 Гц промежуточные пики не формируются, поэтому в зоне развитых волн значение  $\langle Nu_x \rangle$  монотонно растет с увеличением координаты. Для высоких частот

(кривая 2) расстояние между пиками существенно меньше, поэтому значения  $\langle Nu_x \rangle$  меньше, чем для низких частот.

На рис. 10 показаны зависимости среднего по времени локального числа Рейнольдса от координаты для различных значений частоты.

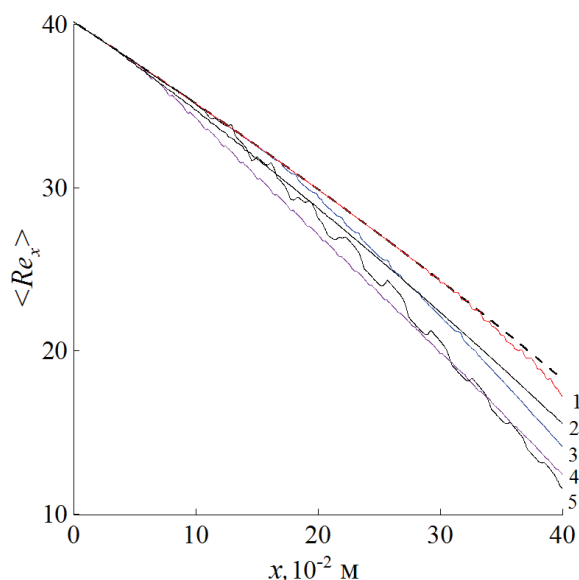


Рис. 10. Зависимость локального числа Рейнольдса от координаты для различных значений частоты: 1) естественные волны; 2) 30; 3) 5; 4) 18; 5) 8 Гц; штриховая линия — теоретическое значение для гладкой пленки

Вследствие испарения расход жидкости в пленке падает с увеличением расстояния. Интенсификация теплопереноса за счет волн приводит к более резкому падению значений  $\langle Re_x \rangle$ , при этом крутизна кривых на рис. 10 зависит от частоты. Наименьшее значение  $\langle Re_x \rangle$  в конце участка счета достигается для частоты 8 Гц, для которой реализуется максимальное значение  $\langle Nu_x \rangle$ . Близкое к этому значение  $\langle Re_x \rangle$  получается для частоты

18 Гц за счет того, что нелинейные волны развиваются несколько раньше, чем для 8 Гц.

Для пленки с испарением точно так же, как и в случае конденсации, локальное число Нуссельта определяется в основном минимальной толщиной пленки на участке между пиками и длиной этого участка, которая растет вследствие слияния отдельных пиков.

### Заключение

Численным методом исследована динамика нелинейных волн в испаряющейся пленке воды и их влияние на теплоперенос. Показано, что при умеренных значениях числа Рейнольдса на поверхности пленки развиваются естественные волны, обусловленные неустойчивостью течения. Впервые изучена эволюция возбужденных волн в широком диапазоне частот. Проведенные расчеты выявили следующие закономерности.

Естественные и возбужденные волны на некотором расстоянии от входа быстро развиваются в нелинейные волны большой амплитуды. Возбужденные волны начинают развиваться на значительно меньшем расстоянии, чем естественные. Амплитуда развитых волн падает с увеличением расстояния. Интенсификация теплопереноса волнами происходит в основном из-за уменьшения толщины пленки между пиками. Так же, как и в случае конденсации, локальное число Нуссельта определяется в основном длиной участка между пиками, которая возрастает в процессе взаимодействия и слияния отдельных пиков. Развитие нелинейных волн в испаряющейся пленке очень чувствительно к внешнему периодическому воздействию. Таким образом, за счет периодического воздействия в определенном диапазоне частот можно интенсифицировать процесс испарения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-01-00360-а и гранта Президента РФ по господдержке ведущих научных школ РФ (№ НШ-5762.2014.8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chun K.R., Seban R.A. Heat transfer to evaporating liquid films // Trans. ASME J. Heat Transfer. – 1971. – V. 93. – P. 391–396.
2. Hirshburg R.I., Florschuetz L.W. Laminar wavy-film flow. P. II. Condensation and evaporation // Trans. ASME J. Heat Transfer. – 1982. – V. 104. – P. 459–464.
3. Wave frequency of falling liquid films and the effect on reflux condensation in vertical tubes / U. Gross, Th. Storch, Ch. Philipp, A. Doeg // Int. J. Multiphase Flow. – 2009. – V. 35. – P. 398–409.
4. Теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении в элементах оборудования АЭС / И.И. Гогонин, И.А. Шемагин, В.М. Будов, А.Р. Дорохов / под ред. В.Е. Накорякова. – М.: Энергоиздат, 1993. – 208 с.
5. Капица П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18. – № 1. – С. 3–28.
6. Капица П.Л., Капица С.П. Волновые течения тонких слоев вязкой жидкости // ЖЭТФ. – 1949. – Т. 19. – № 2. – С. 105–120.
7. Шкадов В.Я. Волновые режимы течения тонкого слоя вязкой жидкости под действием силы тяжести // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1967. – № 1. – С. 43–51.
8. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave Flow of Liquid Films. – NY: Begell House, 1994. – 313 p.
9. Chang H.-C., Demekhin E.A. Complex wave dynamics on thin films. – Amsterdam, Elsevier, 2002. – 402 p.
10. Bankoff S.G. Stability of liquid flow down a heated inclined plane // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1971. – V. 14. – № 1. – P. 377–385.
11. Spindler B. Linear stability of liquid films with interfacial phase change // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1982. – V. 25 – № 2. – P. 161–173.
12. Marshall E., Lee C.Y. Stability of condensate flow down a vertical wall // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1973. – V. 116. – № 1. – P. 41–48.
13. Unsal M., Thomas W.C. Linear stability analysis of film condensation // ASME Journal of Heat Transfer. – 1978. – V. 100. – № 4. – P. 629–634.
14. Трифонов Ю.Я. Волнообразование при стекании пленки вдоль наклонной поверхности при наличии фазового перехода и ка-



- сательного напряжения на свободной поверхности // Прик. Мех. и Техн. Физ. – 1996. – Т. 37. – № 2. – С. 109–119.
15. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Влияние фазового превращения на устойчивость пленки жидкости, движущейся под действием гравитации и турбулентного потока пара // VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений. – Минск, 19–23 мая 2008. – Т. 2. – С. 3–5.
  16. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Influence of condensation on the stability of a liquid film moving under the effect of gravity and turbulent vapor flow // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2005. – V. 48. – P. 1039–1052.
  17. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Устойчивость пленки конденсата, движущейся под действием гравитации и турбулентного потока пара // Теплофизика высоких температур. – 2003. – Т. 41. – № 1. – С. 89–97.
  18. Stuhltrager E., Miyara A., Uehara H. Flow dynamics and heat transfer of a condensate film on a vertical wall. P. II. Flow dynamics and heat transfer // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1995. – V. 38. – P. 2715–2722.
  19. Miyara A. Numerical analysis on flow dynamics and heat transfer of falling liquid films with interfacial waves // Heat Mass Transfer. – 1999. – V. 35. – P. 298–306.
  20. Miyara A. Numerical analysis on heat transfer enhancement by waves on falling liquid film // J. of Thermal Science. – 2000. – V. 9. – № 3. – P. 236–242.
  21. Miyara A. Flow dynamics and heat transfer of wavy condensate film // ASME, J. Heat Transfer. – 2001. – V. 123. – P. 492–500.
  22. Serifi K., Malamataris N.A., Bontozoglou V. Transient flow and heat transfer phenomena in inclined wavy film // J. Thermal Sciences. – 2004. – V. 43. – P. 761–767.
  23. Актершев С.П. Теплоперенос в ламинарно-волновых стекающих пленках жидкости // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 385–396.
  24. Malamataris N.A., Balakotaiah V. Flow structure underneath the large amplitude waves of a vertically falling film // AIChE. – 2008. – V. 54. – № 7. – P. 1725–1740.
  25. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Nonlinear waves and heat transfer in a falling film of condensate // Phys. Fluids. – 2013. – V. 25. – P. 1–20.
  26. Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение пленки конденсата // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – № 1. – С. 84–92.
  27. Argyriadi K., Serifi K., Bontozoglou V. Nonlinear dynamics of inclined films under low-frequency forcing // Phys. Fluids. – 2004. – V. 16. – P. 2457–2468.

Поступила 30.01.2014 г.

UDC 536. 24.01

## WAVE FLOW OF THE EVAPORATING LIQUID FILM

**Sergey P. Aktershev,**

Cand. Sc., Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk,  
Ac. Lavrentyev avenue, 1. E-mail: sergey-aktershev@mail.ru

**Sergey V. Alekseenko,**

Dr. Sc., Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk,  
Ac. Lavrentyev avenue, 1. E-mail: aleks@itp.nsc.ru

*Nonlinear wave formation and heat transfer in a laminar falling liquid film in the presence of evaporation are studied numerically. The integral-boundary-layer model, modified with account of the phase change has been used to describe the wave motion. Numerical simulation of waves in a non isothermal film flow in the presence of evaporation on an interface is carried out. It is shown that the natural waves caused by instability of flow occur on a surface of evaporating liquid film. For the first time the authors studied the evolution of excited waves in an evaporating film. It is shown that the forced waves occur on smaller distance, than natural ones. The amplitude of the developed waves drops with distance increase. Heat transfer wave intensification is mainly caused by decrease of a film thickness between peaks. Local Nusselt number is determined by distance between the peaks which increases at interaction and merging of some peaks. It is shown that the forced waves intensify essentially heat transfer within a certain range of frequencies in comparison with the naturally occurred waves.*

### Key words:

*Liquid film, evaporation, nonlinear waves, heat transfer, numerical simulation.*

### REFERENCES

1. Chun K.R., Seban R.A. Heat transfer to evaporating liquid films. *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 1971, vol. 93, pp. 391–396.
2. Hirshburg R.I., Florschuetz L.W. Laminar wavy-film flow. P. II. Condensation and evaporation. *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 1982, vol. 104, pp. 459–464
3. Gross U., Storch Th., Philipp Ch., Doeg A. Wave frequency of falling liquid films and the effect on reflux condensation in vertical tubes. *Int. J. Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, pp. 398–409.
4. Gogonin I.I., Shemagin I.A., Budov V.M., Dorokhov A.R. *Теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении в элементах оборудования AES* [Heat Transfer during Film Condensation and Film Boiling in Elements of Equipment at Nuclear Power Plants]. Ed. by V.E. Nakoryakov. Moscow, Energoizdat Publ., 1993. 208 p.
5. Kapitsa P.L. Volnovoe techenie tonkikh sloev vyazkoy zhidkosti [Wave flow of thin layers of a viscous fluid]. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 1948, vol. 18, no. 1, pp. 3–28.

6. Kapitsa P.L., Kapitsa S.P. Volnovye techeniya tonkikh sloev vyazkoy zhidkosti [Wave flow of thin layers of a viscous fluid]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 1949, vol. 19, no. 2, pp. 105–120.
7. Shkadov V.Ya. Volnovye rezhimy techeniya tonkogo sloya vyazkoy zhidkosti pod deystviem sily tyazhesti [Wave flow regimes of a thin layer of viscous fluid under gravity]. *Izvestiya AN SSSR*. 1967, no. 1, pp. 43–51.
8. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. *Wave flow of Liquid films*. NY, Begell House, 1994. 313 p.
9. Chang H.-C., Demekhin E.A. *Complex wave dynamics on thin films*. Amsterdam, Elsevier, 2002. 402 p.
10. Bankoff S.G. Stability of liquid flow down a heated inclined plane. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1971, vol. 14, no. 1, pp. 377–385.
11. Spindler B. Linear stability of liquid films with interfacial phase change. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1982, vol. 25, no. 2, pp. 161–173.
12. Marshall E., Lee C.Y. Stability of condensate flow down a vertical wall. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1973, vol. 116, no. 1, pp. 41–48.
13. Unsal M., Thomas W.C. Linear stability analysis of film condensation. *ASME, Journal of Heat Transfer*, 1978, vol. 100, no. 4, pp. 629–634.
14. Trifonov Yu.Ya. Volnoobrazovanie pri stekanii plenki vdol nakhonnnoy poverkhnosti pri nalichii fazovogo perekhoda i kasatel'nogo napryazheniya na svobodnoy poverkhnosti [Wave formation at a film flowing down inclined plane with account for phase transition and shear stress on the interface]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, pp. 241–249.
15. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Vliyaniye fazovogo prevrashcheniya na ustoychivost plenki zhidkosti dvizhushcheysya pod deystviem gravitatsii i turbulentnogo potoka para [Influence of phase change on stability of liquid film moving under gravity and turbulent vapor flow]. *Trudy VI Minskogo Mezhdunarodnogo Forumu* [Proc. 6<sup>th</sup> International Heat and Mass Transfer Forum, MIF]. Minsk, 2008, vol. 2, pp. 3–5.
16. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Influence of condensation on the stability of a liquid film moving under the effect of gravity and turbulent vapor flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, vol. 48, pp. 1039–1052.
17. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Ustoychivost plenki kondensata dvizhushcheysya pod deystviem gravitatsii i turbulentnogo potoka para [The stability of a condensate film moving under gravity and turbulent vapor flow]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2003, vol. 41, no. 1, pp. 79–87.
18. Stuhltrager E., Miyara A., Uehara H. Flow dynamics and heat transfer of a condensate film on a vertical wall–II. Flow dynamics and heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, vol. 38, pp. 2715–2722.
19. Miyara A. Numerical analysis on flow dynamics and heat transfer of falling liquid films with interfacial waves. *Heat Mass Transfer*, 1999, vol. 35, pp. 298–306.
20. Miyara A. Numerical analysis on heat transfer enhancement by waves on falling liquid film. *J. of Thermal Science*, 2000, vol. 9, no. 3, pp. 236–242.
21. Miyara A. Flow dynamics and heat transfer of wavy condensate film. *ASME, J. Heat Transfer*, 2001, vol. 123, pp. 492–500.
22. Serifi K., Malamataris N.A., Bontozoglou V. Transient flow and heat transfer phenomena in inclined wavy film. *J. Thermal Sciences*, 2004, vol. 43, pp. 761–767.
23. Aktershev S.P. Teploperenos v laminarno-volnovykh stekayushchikh plenkakh zhidkosti [Heat transfer in falling laminar-wavy liquid films]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, pp. 359–370.
24. Malamataris N.A., Balakotaiah V. Flow structure underneath the large amplitude waves of a vertically falling film. *AICHE*, 2008, vol. 54, no. 7, pp. 1725–1740.
25. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Nonlinear waves and heat transfer in a falling film of condensate. *Physics of Fluids*, 2013, vol. 25, pp. 1–20.
26. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Volnovoe techenie plenki kondensata [Wave flow of the condensate film]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 78–85.
27. Argyriadi K., Serifi K., Bontozoglou V. Nonlinear dynamics of inclined films under low-frequency forcing. *Phys. Fluids*, 2004, vol. 16, pp. 2457–2468.

УДК 697.134

## ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЧЕРДАЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ С НЕТИПОВОЙ КРОВЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА

**Анисимов Максим Васильевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»  
Томского государственного архитектурно-строительного университета,  
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: teploproekt@list.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью обеспечения эффективной тепловой защиты чердачных перекрытий в зданиях с длительным сроком эксплуатации, имеющих нетиповую кровлю, при проведении капитального ремонта.

**Цель работы:** решение проблемы возникновения условий формирования «точки росы» на поверхностях ограждающих конструкций жилого здания с нетиповой кровлей при проведении капитального ремонта; разработка рекомендаций по устранению условий конденсации влаги на ограждающих конструкциях путем укладки перед вентиляционным продухом минераловатных плит расчетной толщины.

**Методы исследования:** предложенная физико-математическая модель теплового состояния чердачного пространства с учетом воздухообмена и конструктивных особенностей нетиповой кровли. Численное решение поставленной задачи с использованием разработанного программного комплекса.

**Результаты:** Разработана расчетная схема влияния теплотехнических параметров и воздухообмена чердачного пространства нетиповой кровли на температурные поля в ее ограждающих конструкциях. Осуществлен подбор эффективной толщины утепляющего слоя в чердачном пространстве, который позволит, не проводя никаких дополнительных мероприятий, исключить условия формирования конденсата на ограждающих конструкциях внутри жилых помещений.

### Ключевые слова:

Воздухообмен, «точка росы», ограждающие конструкции, температурные поля, чердачное перекрытие.

### Анализ проблемы

В настоящее время жилые здания массовой застройки, введенные в эксплуатацию в конце XX в., зачастую имеют большую степень износа и требуют проведения капитального ремонта. Одной из наиболее уязвимых частей здания является его кровля. Кроме того, утеплитель который используется для тепловой защиты жилых помещений последнего этажа, также требует замены, т. к. в качестве утеплителя, как правило, использовался керамзит или его аналоги, а требования к тепловой защите здания за последнее время существенно возросли.

В случае, когда устройство кровли здания является не серийным, при проведении капитального ремонта может возникнуть целый ряд инженерных теплотехнических задач по эффективному утеплению чердачного перекрытия и обеспечению нормативного воздухообмена в чердачном пространстве. Зачастую, руководствуясь только лишь требованиями нормативных документов, не возможно с удовлетворительной точностью определить размеры вентиляционных чердачных продухов либо выполнить мероприятия по утеплению чердачного перекрытия (например, если здание не имеет чердачного этажа).

В соответствии с [1], результирующая температура помещения также является одним из показателей микроклимата. На указанный показатель напрямую влияет и температура поверхностей ограждающих конструкций внутри жилых помещений. Несоблюдение температурного режима эксплуатации зданий (в том числе чердачного перекрытия) может привести к тому, что после проведенных мероприятий по реконструкции параме-

тры микроклимата в помещениях последнего этажа (граничащего с чердачным пространством) могут отличаться от нормативных. Поэтому обеспечение нормативных параметров микроклимата (результатирующей температуры помещения) в зданиях при проведении капитального ремонта является актуальной задачей.

Так, при проведении капитального ремонта одного из жилых зданий, построенных в конце XX в. в г. Томске, размеры продухов в чердачном пространстве были увеличены в соответствии с требованиями [2]. При этом жильцы дома, проживающие на последнем (пятом) этаже, стали подавать жалобы в ТСЖ о том, что на поверхности перекрытий (вблизи наружных стен) стал возникать водяной конденсат. Натурные исследования показали, что увеличение размеров вентиляционных продухов привело к существенному увеличению воздухообмена в чердачном пространстве и его чрезмерному «выхолаживанию». Вследствие чего было выдвинуто предположение о том, что отсутствие на перекрытии (со стороны вентилируемого чердачного пространства) эффективной тепловой изоляции могло повлечь за собой промерзание перекрытий над последним этажом и создать условия для возникновения на поверхности перекрытия «точки росы».

### Обзор современных методов теплового расчета чердачных ограждающих конструкций

При проведении обзора расчетов теплового состояния здания следует отметить работы таких авторов как К.Ф. Фокин, В.Н. Богословский, А.В. Лыков и др. [3–8], а также зарубежных специалистов R.W. Serth, J.H. Lienhard IV и др. [9–13].

На сегодняшний день существует ряд методик теплового расчета ограждающих конструкций зданий различного назначения. Анализ данных методик показал, что в ряде случаев их применение в расчете тепловой изоляции уже существующих зданий, в которых капитальные ремонты проводились с некоторой периодичностью, затруднительно, либо они не позволяют учесть реальные конструктивные и теплотехнические условия эксплуатации зданий. При проведении ремонта зачастую отсутствует комплексный анализ состояния здания и такая реконструкция, устраняя одни проблемы, может породить новые.

На стадии проектирования для расчета утепления ограждающих конструкций зданий, в том числе чердачного перекрытия, применяется нормативная методика СНиП [14]. В соответствии с данной методикой, толщина и теплофизические свойства утеплителя чердачного перекрытия определяются по условиям энергоэффективности и в соответствии с климатическими особенностями региона проектирования здания. Тем не менее, такая методика не может учесть влияние воздухообмена чердачного пространства и дает расхождение с реальными условиями в случае, если воздухообмен не является нормативным. Несоответствие реального воздухообмена и нормативного наблюдается, когда производится ремонт ограждающих конструкций и вентиляционных продухов без комплексного теплотехнического учета их влияния на температурный режим ограждающих конструкций внутри здания.

Тепловой расчет «теплого» чердака жилого здания рассмотрен в диссертационной работе И.И. Старовойтовой [15]. Указанная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, однако данная методика предложена для решения теплотехнических задач в условиях обогреваемого чердака, имеющего несколько циркуляционных воздушных зон – естественной конвекции и струйной циркуляции, возникающей вследствие естественной вентиляции из жилых квартир. Сравнение условий применимости показало, что в рассматриваемом бесчердачном пространстве преобладает ламинарное течение воздушных потоков со стороны вентиляционных продухов, что делает затруднительным применение методики И.И. Старовойтовой в рассматриваемой теплотехнической задаче, т. к. формирование тепловых потоков происходит без влияния вертикальных воздушных струй естественной вентиляции.

В итоге можно сделать вывод, что имеющиеся на сегодняшний день методики теплового расчета чердачных пространств либо недостаточно «гибки» и не позволяют учитывать изменения некоторых параметров, в связи с корректировкой конструктива здания, либо разработаны для решения «узких» задач. При этом попытка привязать их к отличающимся архитектурно-строительным и

теплотехническим условиям может повлечь за собой возникновение ошибок при расчете.

#### **Математическое моделирование теплового состояния чердачного пространства с учетом его воздухообмена**

Для проверки гипотезы был проведен анализ конструкции кровли с чердачным пространством, количества и размеров продухов, а также типа и состояния утеплителя. Кровля здания обладала рядом особенностей – конструкция ее после проведения укладки кровельного железа не позволяла произвести замену всего утепляющего слоя (т. к. доступ к нему ввиду ограниченности пространства отсутствовал), воздухообмен внутри производился за счет продухов в наружной стене, а также вентиляционных воздуховодов, установленных на кровле здания.

На рис. 1 приведен принципиальный разрез чердачного пространства здания, на котором показана схема движения воздуха от продуха до вентиляционного воздуховода с выходом его через кровлю.

Покрытие кровли – стальной лист, кровля не утепленная. На рис. 1 показан разрез чердачного пространства до внутренней «глухой» стены. С другой стороны внутренней стены также имеется аналогичное «зеркальное» неэксплуатируемое пространство. Кровля в здании имеет два ската с верхней точкой кровли в области внутренней «глухой» (не имеющей отверстий) стены.

Вентиляционный продух после реконструкции имел размеры 200×400 мм. Толщина имеющегося утепляющего слоя (слой насыпного керамита) – 100 мм. Размеры стены с продухом и внутренней стеной указаны на рис. 1. На рис. 1, а приведен принципиальный разрез чердачного пространства до проведения ремонтных работ, а на рис. 1, б – после выполнения ремонтных работ с рекомендуемым к укладке слоем утеплителя из минераловатных плит. Выбор типа утеплителя из минераловатных плит был обусловлен хорошими теплотехническими свойствами, а также возможностью легкой транспортировки плит и укладки их перед вентиляционными продухами (внутри чердачного пространства) без демонтажа кровли (непосредственно через продухи).

Для определения факторов, влияющих на формирование «точки росы» на поверхности перекрытия, была разработана физико-математическая модель тепломассобмена чердачного пространства с окружающей средой, рис. 2.

При рассмотрении задачи прогнозирования возникновения условий для формирования «точки росы» на поверхностях ограждающих конструкций была сформулирована задача в двумерной постановке (1)–(4).

Граничные условия для слоя 1 (кровельный слой):



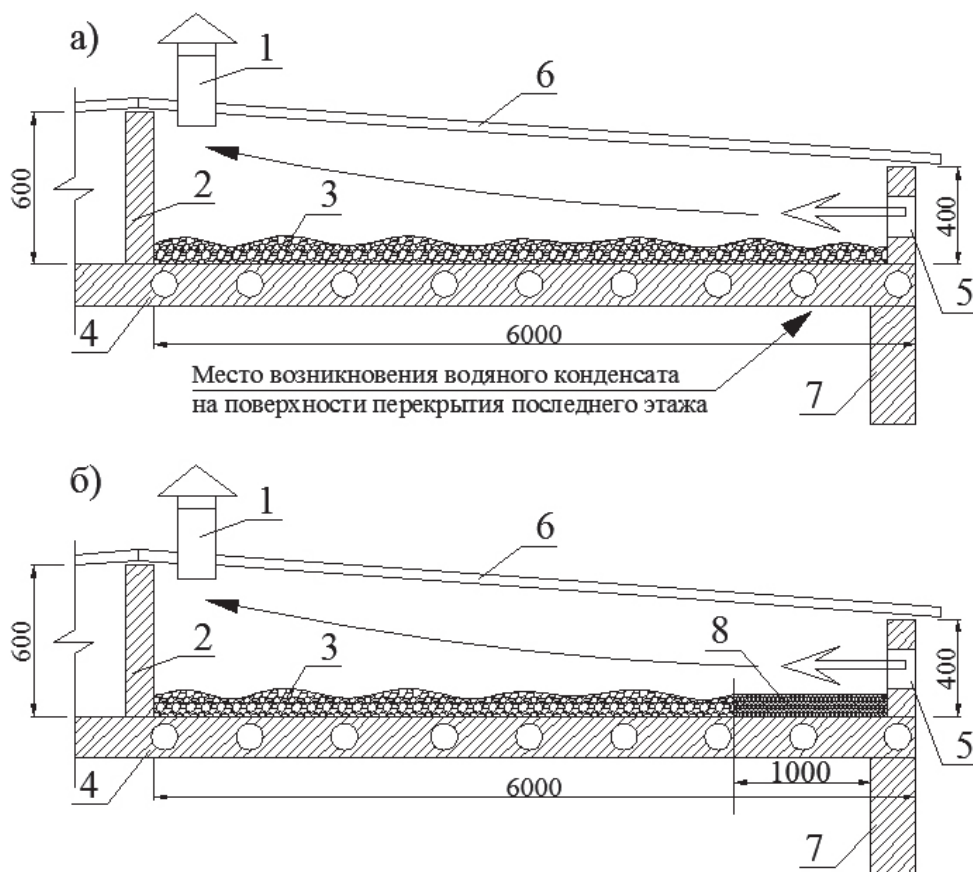


Рис. 1. Принципиальная схема чердачного пространства жилого здания: 1 – вентиляционный воздуховод; 2 – внутренняя «глухая» стена; 3 – слой утеплителя (керамзит); 4 – плита перекрытия над жилыми помещениями; 5 – вентиляционный продух; 6 – скатная кровля (поверхность из листового железа); 7 – наружная стена здания; 8 – слой утеплителя (минеральные плиты)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } y = y_n; x_1 \leq x \leq x_n; t_{n1} = t_{\text{нар}}; \\ \text{при } y = y_3; x_1 \leq x \leq x_n; \alpha_{n2}(t_B - t_{n2}) = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\ \text{при } x = x_n; y_3 \leq y \leq y_n; q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \\ \text{при } x = x_1; y_3 \leq y \leq y_n; q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \lambda = \text{const}, \end{array} \right. (1)$$

где  $\alpha_{n2}$  – коэффициент теплоотдачи вблизи поверхности покрытия кровли, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материальных слоев в принятой схеме, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Граничные условия для слоя 2 (воздух в чердачном пространстве):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } y = y_3; x_1 \leq x \leq x_n; \alpha_{n2}(t_B - t_{n2}) = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\ \text{при } y = y_2; x_1 \leq x \leq x_n; \alpha_{n3} \cdot (t_{n3} - t_B) = -\lambda \frac{\partial T_3}{\partial y}; \\ \text{при } x = x_n; y_2 \leq y \leq y_3; t_{xn} = f(t_{\text{нар}}, v, L), \\ \text{при } x = x_1; y_2 \leq y \leq y_3; q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \end{array} \right. (2)$$

где  $\alpha_{n3}$  – коэффициент теплоотдачи вблизи поверхности чердачного перекрытия, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $v$  и  $L$  – скорость движения воздуха (м/с) и расход воздуха (м<sup>3</sup>/ч) через вентиляционный продух, соответственно.

Граничные условия для слоя 3 (чердачное перекрытие):

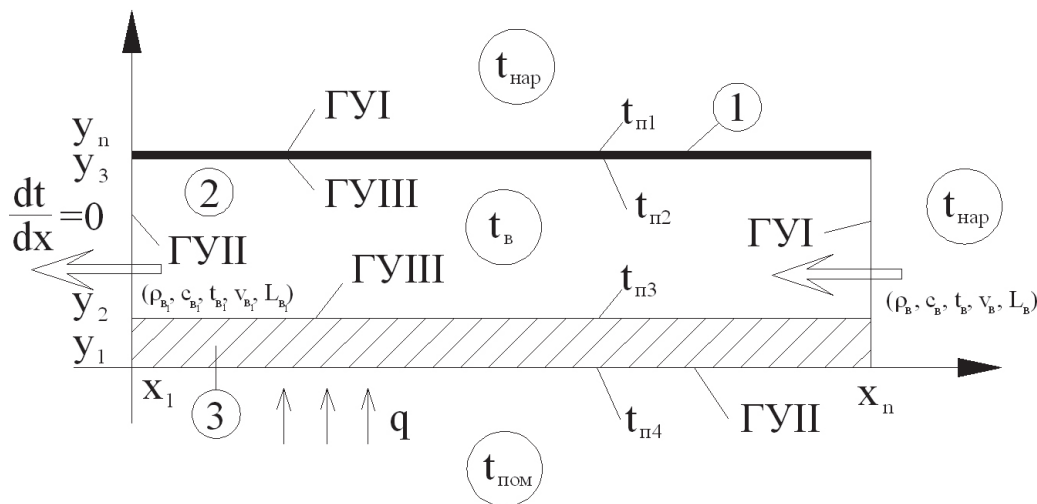
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } y = y_2; x_1 \leq x \leq x_n; \alpha_{n3}(t_{n3} - t_B) = -\lambda \frac{\partial T_3}{\partial y}; \\ \text{при } y = y_1; x_1 \leq x \leq x_n; q = \text{const}; \\ \text{при } x = x_n; y_1 \leq y \leq y_2; q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ \text{при } x = x_1; y_1 \leq y \leq y_2; q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \end{array} \right. (3)$$

где  $q = \text{const}$  – нормативный тепловой поток из жилых помещений через чердачное перекрытие, Вт.

В общем виде в декартовой системе координат уравнение теплопроводности выглядит как

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q, \quad (4)$$

где  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость, а  $Q$  – внутренние источники тепловыделений (в данном случае  $Q=0$ , т. к. тепловыделений нет).



**Рис. 2.** Расчетная схема математической модели: 1 – покрытие кровли; 2 – внутренний воздух в чердачном пространстве; 3 – перекрытие над жилыми помещениями; ГУ I, ГУ II, ГУ III – граничные условия;  $\rho_v, c_v, t_v, v_v, L_v$  – плотность, теплоемкость, температура, скорость и расход воздуха соответственно;  $q$  – удельный тепловой поток

Тепловой баланс чердачного перекрытия (5) будет являться разницей теплоты, поступающей через перекрытие от жилых помещений  $Q_{пер}$  (6), и потерь теплоты, идущих на нагревание приточного воздуха  $Q_{инф}$  (7) (через вентиляционные продухи) и за счет теплопередачи через покрытие кровли  $Q_k$ .

$$Q = Q_{пер} - Q_{инф} - Q_k. \quad (5)$$

Тепловой поток через перекрытие чердачного этажа ( $Q_{пер}$ ) [3], Вт

$$Q_{пер} = \frac{F}{R_{пер}}(t_{п4} - t_{п3}), \quad (6)$$

где  $F$  – площадь ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>;  $R_{пер}$  – приведенное сопротивление теплопередаче чердачного перекрытия, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $t_{п4}, t_{п3}$  – температура на поверхностях чердачного перекрытия, К.

Тепловые потери на нагрев воздуха, поступающего через вентиляционные продухи, вычислялись по известным зависимостям, приведенным в [16], Вт.

$$Q_{инф} = 0,28LC_{рв}\rho_v(\Delta T), \quad (7)$$

где  $L$  – расход приточного воздуха, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{рв}$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·С);  $\rho_v$  – плотность приточного воздуха (8), кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T$  – разность температур приточного воздуха и воздуха внутри чердачного пространства, С. Плотность воздуха с удовлетворительной точностью можно определить по следующей зависимости:

$$\rho = \frac{353}{T_v}, \quad (8)$$

где  $T_v$  – температура воздуха, К.

Для описания процесса конвективного теплообмена на границе «воздух – чердачное перекрытие» использовались зависимости, приведенные в СНиП 2.06.04–82 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения» [17], Вт/(м<sup>2</sup>·С)

$$\alpha = 23\sqrt{v_{ср} + 0,3}, \quad (9)$$

где  $v_{ср}$  – средняя скорость ветра, м/с.

Из зависимости (9) видно, что коэффициент теплоотдачи на границе «воздух – чердачное перекрытие» является функцией от скорости движения ветра.

Ввиду малых температур на поверхностях ограждающих конструкций внутри чердачного пространства, а следовательно и значений количества теплоты, теряемой различными поверхностями за счет излучения (1...2 % от суммарных тепловых потерь) этой составляющей теплообмена пренебрегаем.

При разработке модели теплообмена чердачного пространства были сделаны некоторые допущения:

1. Скорость движения воздуха в вентиляционном продухе была принята как нормативная для данного климатического региона [18].
2. Тепловой поток, идущий через чердачное перекрытие, был принят нормативным [19].
3. Не были учтены суточные колебания скорости движения ветра снаружи здания.
4. Сопротивление теплопередачи чердачного перекрытия считалось как приведенное с учетом слоя утеплителя.
5. Теплопроводность слоя утеплителя принималась по паспортным данным фирмы-производителя, с учетом пребывания его в увлажненном состоянии.
6. Воздух, поступающий в чердачное пространство, равномерно распределялся по перекрытию и двигался от продуха до вентиляционного воздуховода.
7. Теплота, идущая через чердачное перекрытие, полностью усваивается приточным холодным воздухом.
8. Относительная влажность воздуха внутри жилых помещений была принята в соответствии с нормативными требованиями.

9. Температура воздуха внутри жилых помещений была принята равной нормативной  $t_{\text{пом}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

10. Температура «точки росы» для ограждающих конструкций внутри жилых помещений определялась по нормативной методике [14].

После принятия ряда допущений данная задача решалась для стационарного режима теплопередачи, т. к. было принято, что тепловые процессы являются установившимися.

Для решения поставленной задачи вся длина чердачного перекрытия была условно разделена на метровые зоны (всего 6 зон, рис. 1), через которые равномерно проходила струя наружного воздуха. При этом теплота от чердачного перекрытия полностью передавалась воздуху, имеющему скорость движения в чердачном пространстве  $v_{\text{в}}=f(v_{\text{ветра}})$ .

В соответствии с зависимостью (6) можно определить температуру поверхности перекрытия  $t_{\text{п4}}$  (рис. 1), предварительно приняв температуру приточного воздуха.

Для определения температуры формирования «точки росы» на поверхности ограждающих конструкций была использована нормативная методика [14].

На основе анализа существующих численных методов решения теплотехнических задач для решения задачи теплообмена чердачного пространства с окружающей средой был выбран широко используемый метод прогонки с неявной разностной схемой, который зачастую используется при решении подобного рода технологических задач [20].

#### Сравнение результатов натурных наблюдений с результатами численного решения

Для облегчения расчетов разработанная схема была реализована в виде компьютерной програм-

мы с возможностью проведения численного эксперимента моделирования условий формирования «точки росы» на поверхностях ограждающих конструкций. Данная программа обеспечивала расчет температурных полей чердачного перекрытия с учетом изменения исходных данных, таких как: температура воздуха, скорость движения приточных струй, геометрические размеры продухов и теплотехнические характеристики основных ограждающих конструкций.

В таблице приведены исходные данные к расчету.

Таблица. Исходные данные

Исходные данные	Значение
Температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-40
Скорость ветра, м/с	2,4
Площадь единичного вентиляционного продуха, $\text{м}^2$	0,08
Температура воздуха в жилых помещениях, $^{\circ}\text{C}$	20
Относительная влажность воздуха в жилых помещениях, %	40
Марка рекомендуемого утеплителя	Rockwool РУФ БАТТС В
Теплопроводность утеплителя, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,05
Габариты листа утеплителя, мм	1000×600×40

По результатам проведенных расчетов были получены температуры основных поверхностей в рассматриваемой расчетной схеме (рис. 2).

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при фактическом сечении продуха 1-я «метровая зона» попадает в условия формирования «точки росы» на поверхности перекрытия, граничащего с чердачным пространством,

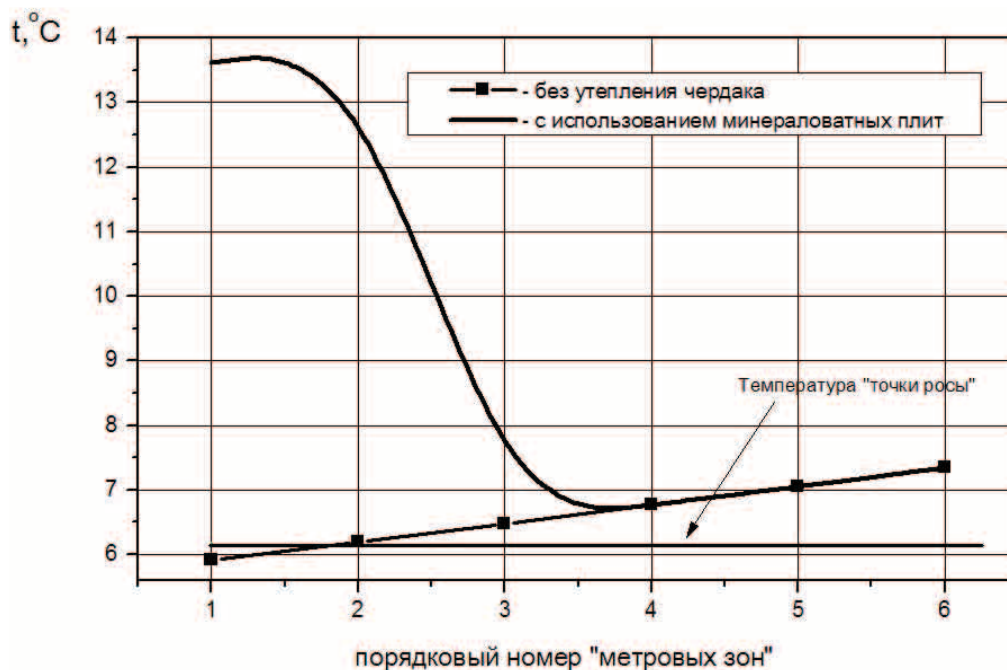


Рис. 3. Результаты численного исследования

что удовлетворительно согласуется с наблюдениями жильцов верхнего этажа. При проведении численного моделирования было получено, что для предотвращения условий формирования «точки росы» на перекрытиях достаточно слоя минераловатного утеплителя Rockwool РУФ БАТТС В толщиной 10 мм. На рис. 3 кривой линией показан результат численного моделирования поведения температуры на поверхности перекрытия внутри жилых квартир, из которого видно, что для решения проблемы достаточно произвести укладку принятого утеплителя на расстоянии до 1 м от существующих продухов.

Это позволит существенно повысить температуру на потолочных перекрытиях внутри жилых квартир в зонах, прилегающих к наружной стене, где, по мнению жильцов, и наблюдается водяной конденсат.

#### Выводы

В результате проделанной работы была предложена расчетная схема оценки влияния теплотехнических параметров чердачного пространства нетиповой кровли на температурные поля в ее ограждающих конструкциях. Разработанный программный комплекс позволяет проводить оценку температурных полей чердачного перекрытия с утепли-

телем, в зависимости от размеров вентиляционных продухов и воздухообмена в бесчердачном пространстве, а также определять эффективную толщину утепляющего слоя для обеспечения нормативных параметров микроклимата в жилых помещениях, граничащих с чердачным пространством.

Сравнение результатов, полученных при расчете с помощью программы, и натурных наблюдений жильцов дома показало их удовлетворительную согласованность.

Был проведен подбор эффективной толщины утепляющего слоя в чердачном пространстве, который бы позволил, не проводя никаких дополнительных мероприятий (например, изменения геометрических размеров продухов или демонтажа кровли), исключить условия формирования конденсата на ограждающих конструкциях жилых помещений. Существующие маты Rockwool РУФ БАТТС В имеют толщину листа 40 мм, поэтому целесообразно использование имеющихся типовых размеров, что не противоречит результатам расчета (для устранения конденсации достаточно толщины утеплителя 10 мм). Результаты исследований в виде рекомендаций были переданы сотрудникам местного ТСЖ для проведения работ по нормализации параметров микроклимата в жилых квартирах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30494–96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Введ. 01.03.1999. – М.: Госстрой России, 1999. – 18 с.
2. СП 17.13330.2011. Кровли. Введ. 20.05.2011. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 61 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.В. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
4. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Высш. школа, 1979. – 397 с.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – М.: Высш. Школа, 1982. – 415 с.
6. Еремкин А.И., Королева Т.И. Тепловой режим зданий. – М.: Изд-во Ассоциации стр-х вузов, 2001. – 368 с.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
8. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
9. Belmiloudi A. Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology. – Croatia: InTech, 2011. – 654 p.
10. Louis Th. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. – 664 p.
11. Annaratone D. Engineering Heat Transfer. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 344 p.
12. John H Lienhard IV., John H Lienhard V. A Heat Transfer Textbook. – USA; Cambridge; MA: Phlogiston press, 2011. – 766 p.
13. Serth R.W. Process Heat Transfer. – USA: Elsevier Science and Technology Book, 2007. – 755 p.
14. СП 23–101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Взамен СП 23–101–2000; введ. 26.03.2004. – М.: Госстрой России, 2004. – 86 с.
15. Староверова И.И. Тепловоздушный режим теплых чердаков и прилегающих помещений современных жилых зданий повышенной этажности в холодный период года: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1984. – 334 с.
16. СНиП 41–01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Взамен СНиП 2.04.05–91\*; введ. 01.01.2004. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 54 с.
17. СНиП 2.06.04–82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Госстрой России, 1989. – 49 с.
18. СНиП 23–01–99. Строительная климатология. Взамен СНиП 2.01.01–82; введ. 01.01.2000. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 65 с.
19. СНиП П-3–79\*. Строительная теплотехника. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 29 с.
20. Карауш С.А., Лысак И.А., Анисимов М.В. Математическое моделирование теплового состояния подвального помещения // Вестник ТГАСУ. – 2006. – № 2. – С. 133–141.

Поступила 20.11.2013 г.



## THERMAL PROTECTION SHIELD OF ATTIC FLOOR WHEN REPAIRING MULTI-APARTMENT BUILDING WITH NONSTANDARD ROOFING SYSTEM

Maksim V. Anisimov,

Cand. Sc., Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, 634003,  
Tomsk, Solyanaya square, 2. E-mail: teploproekt@list.ru

**The relevance of the research** is caused by the necessity to ensure the efficiency of attic floor thermal shield when repairing long-life buildings with nonstandard roofing.

**The aim of the research** is to solve the problem of occurrence of «dew point temperature» conditions on to enclosure envelope surface when repairing residential building with non-typical roofing system; to design the considerations relating to removal of moisture condensation cause from building envelope by placing the effective thickness mineral wool boards in front of attic ventilation drain.

**Methods:** the proposed physico-mathematical model of attic-floor space thermal state considering air interchange and design features of nonstandard roofing. Numerical solution of stated problem with the use of the developed software.

**Results:** The author has developed the computational scheme of influence of heat engineering factors and attic air exchanges in non-typical roofing on temperature pattern in its enclosing structures. The effective underlining thickness of attic ventilation drain was selected. It allows excluding the perspiration water conditions on building envelope surface inside accommodations without any additional actions.

### Key words:

Air exchange, «dew point», building envelope, temperature field, attic floor.

### REFERENCES

1. GOST 30494–96. *Zdania zhilie i obshchestvennie. Parametri microclimata v pomeshchenyah* [State Standard 30494–96. Living and public buildings. Parameters microclimate in apartment]. Moscow, Gosstroy Russia, 1999. 18 p.
2. SP 17.13330.2011. *Krovly* [State of rules 17.13330.2011. Roofs]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2011. 61 p.
3. Fokin K.F. *Stroitelnyy teploekhnika ograzdayushchikh chastei zdaniy* [Construction thermal technique for walls of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2006. 256 p.
4. Bogoslovsky V.N. *Teplovoy rezhim zdania* [Thermal regime of buildings]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1979. 397 p.
5. Bogoslovsky V.N. *Stroitelnyy teplofizika* [Thermal physics of construction]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1982. 415 p.
6. Eremkin A.I. *Teplovoy rezhim zdaniy* [Thermal regime of buildings]. Moscow, Assotsiatsiya stroitelnykh vuzov, 2001. 368 p.
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1967. 599 p.
8. Tabunshchikov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical simulation and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2002. 194 p.
9. Belmiloudi A. *Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology*. Croatia, InTech, 2011. 654 p.
10. Louis Th. *Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. 664 p.
11. Annaratone D. *Engineering Heat Transfer*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 344 p.
12. John H Lienhard IV, John H Lienhard V. *A Heat Transfer Textbook*. USA; Cambridge; MA, Phlogiston press, 2011. 766 p.
13. Serth R.W. *Process Heat Transfer*. USA, Elsevier Science and Technology Book, 2007. 755 p.
14. SP 23–101–2004. *Proektirovanie teplovoy zashchiti zdaniy* [State of rules. Design of thermal protection of buildings]. Moscow, Gosstroy Russia, 2004. 86 p.
15. Staroverova I.I. *Teplovozdushniy rezhim teplykh cherdakov i prilagayushchikh pomeshcheniy sovremennykh zhilykh zdaniy povyshennoy etazhnosti v kholodnyy period goda. Diss. kand. nauk* [Thermal and airy regime of heat attics and apartment of modern sublime buildings in cold period of the year. Cand. Diss.]. Moscow, 1984. 334 p.
16. SNiP 41–01–2003. *Otoplenie, ventilyatsiy i konditsionirovanie* [Rules of construction 41–01–2003. Heating, ventilation and conditioning]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2003. 54 p.
17. SNiP 2.06.04–82\*. *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Rules of construction 2.06.04–2003. Load and influence on hydrotechnical constructions]. Moscow, Gosstroy Russia, 1989. 49 p.
18. SNiP 23–01–99. *Stroitelnyy klimatologiya* [Rules of construction 23–01–99. Climatology of construction]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2004. 65 p.
19. SNiP II-3–79\*. *Stroitelnyy teploekhnika* [Rules of construction II-3–79\*. Thermal engineering of constructions]. Moscow, GP CPP, 1996. 29 p.
20. Karaush S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya podvalnogo pomeshcheniya* [Mathematical simulation of cellar thermal condition]. *Vestnik TGASU*, 2006, vol. 2, pp. 133–141.

УДК 536.24

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТЕРЖНЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕПЛОТДАЧИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

**Видин Юрий Владимирович,**

канд. техн. наук, профессор кафедры теплотехники и гидрогазодинамики теплоэнергетического факультета Сибирского Федерального Университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.  
E-mail: roman.kazakov@list.ru

**Казаков Роман Владимирович,**

канд. техн. наук, ассистент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики теплоэнергетического факультета Сибирского Федерального Университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.  
E-mail: roman.kazakov@list.ru

*Аналитические методы, применяемые для изучения процессов теплообмена в ребристых поверхностях, основаны на предположении, что коэффициент теплоотдачи является постоянной величиной. Однако в реальных условиях этот коэффициент оказывается, как правило, переменным, что, в частности, обусловлено изменением температурного напора по длине ребра. Предложен математический метод расчета распределения температуры по длине ребра постоянного поперечного сечения для случая, когда коэффициент теплоотдачи на его поверхности зависит от продольной координаты. Полученное решение задачи основывается на использовании специальных функций Эйри. Благодаря рекомендуемому теоретическому подходу удается устранить одно из широко использовавшихся ранее допущений, а именно, что коэффициент теплоотдачи является постоянной величиной на всей площади ребристой поверхности.*

### Ключевые слова:

Ребро, коэффициент теплоотдачи, специальные функции Эйри, температурное поле, аналитический метод.

Развитые поверхности теплообмена широко используются в различных областях техники [1], так как благодаря оребрению удается заметно интенсифицировать процессы теплопередачи. При изучении теплопроводности ребер, как правило, используют эффективные аналитические методы расчета изменения температуры по их длине [1]. Математическая постановка таких задач включает в себя значения коэффициентов теплоотдачи, которые обычно принимаются постоянными по всей внешней поверхности системы.

Однако на практике могут иметь место случаи, когда такие коэффициенты существенно зависят от пространственной координаты, рассматриваемого сечения. Это обстоятельство приводит к тому, что изучаемая задача в математическом отношении оказывается намного сложнее.

Проведем исследование подобной задачи на примере переноса тепла вдоль стержня постоянного поперечного сечения, которая может быть записана в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{\alpha(x)P}{\lambda f}(t - t_c) = 0, \quad (1)$$

$$t = t_0, \text{ при } x = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dt}{dx} = 0, \text{ при } x = l_0. \quad (3)$$

Здесь  $t=t(x)$  – искомое распределение температуры в ребре длиной  $l$ ;  $t_0, t_c$  – температура основания ребра и окружающей среды соответственно, °С;  $P, f$  – периметр и площадь поперечного сечения

стержня, м, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стержня, Вт/(мК);  $\alpha=f(x)$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности ребра в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>К), который в общем случае зависит от продольной координаты  $x$ .

С математической точки зрения целесообразно представить систему (1)–(3) в безразмерном виде.

Если ввести безразмерные величины  $v = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c}$ ,

$$X = \frac{x}{l}, \quad m^2 = \frac{\alpha_0 P}{\lambda f} l^2, \quad \varphi(x) = \frac{\alpha(x)}{\alpha_0}, \quad \alpha_0 - \text{некоторая}$$

фиксированная величина, то (1)–(3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 v}{dX^2} - \varphi(X)m^2 v = 0, \quad (4)$$

$$v = 1 \text{ при } X = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dv}{dX} = 0 \text{ при } X = 1, \quad (6)$$

Рассмотрим случай, когда функция  $\varphi$  имеет линейный вид

$$\varphi(x) = 1 + \alpha X,$$

где коэффициент  $\alpha \neq 0$ , но  $\alpha > -1$ .

Если  $\alpha = 0$ , то аналитическое решение системы (4)–(6) выражается через элементарные гиперболические функции [1]. Однако при  $\alpha \neq 0$  эта задача существенно усложняется.

Введем новую переменную

$$Z = (1 + \alpha X) \sqrt[3]{M^2},$$

где параметр  $M$  равен

$$M = \frac{m}{\alpha}.$$

Тогда дифференциальное уравнение (4) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 v}{dZ^2} - Zv = 0, \quad (7)$$

а граничные условия (5) и (6) запишутся в форме

$$v = 1 \text{ при } Z_0 = \sqrt[3]{M^2}, \quad (8)$$

$$\frac{dv}{dZ} = 0 \text{ при } Z_1 = (1 + \alpha X) \sqrt[3]{M^2}. \quad (9)$$

Зависимость (7) относится к классу уравнений Эйри (Джон Биддель Эйри (1801–1892) – английский математик и астроном) [2–4].

В связи с этим решение уравнения (7) можно представить через две линейно независимые функции  $Ai(Z)$  и  $Bi(Z)$ , т. е.

$$v = AAi(Z) + BBi(Z), \quad (10)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные интегрирования. Эти постоянные находим из граничных условий (8) и (9). Подставим (10) в (8) и (9), получим систему из двух алгебраических уравнений

$$AAi(Z_0) + BBi(Z_0) = 1,$$

$$AAi'(Z_1) + BBi'(Z_1) = 0.$$

Отсюда следует, что

$$A = \frac{Bi'(Z_1)}{Ai(Z_0)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_0)}, \quad (11)$$

$$B = \frac{-Ai'(Z_1)}{Ai(Z_0)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_0)}. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) решение (10) принимает окончательный вид

$$v = \frac{Bi'(Z_1)Ai(Z) - Ai'(Z_1)Bi(Z)}{Ai(Z_0)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_0)}. \quad (13)$$

Обозначения функций Эйри  $Ai(Z)$  и  $Bi(Z)$  и их производных взяты из справочника [2]. В работе [3] под подобными функциями подразумеваются несколько иные выражения. Так, согласно [2]

$$Ai(Z) = C_1 f(Z) - C_2 g(Z),$$

$$Bi(Z) = \sqrt{3}[C_1 f(Z) + C_2 g(Z)],$$

где

$$f(Z) = 1 + \frac{1}{3!}Z^3 + \frac{1 \cdot 4}{6!}Z^6 + \frac{1 \cdot 4 \cdot 7}{9!}Z^9 + \dots =$$

$$= \sum_{K=0}^{\infty} 3^K \left(\frac{1}{3}\right)_K \frac{Z^{3K}}{(3K)!},$$

$$g(Z) = Z + \frac{2}{4!}Z^4 + \frac{2 \cdot 5}{7!}Z^7 + \frac{2 \cdot 5 \cdot 8}{10!}Z^{10} + \dots =$$

$$= \sum_{K=0}^{\infty} 3^K \left(\frac{2}{3}\right)_K \frac{Z^{3K+1}}{(3K+1)!},$$

$$C_1 = 0,355028,$$

$$C_2 = 0,2588194.$$

В монографии [3] за функции Эйри приняты степенные ряды  $f(-Z)$  и  $-g(Z)$ .

Проведение инженерных расчетов по формуле (13) не представляет никаких сложностей, так как в [2] и [3] приведены подробные таблицы указанных функций и их производных.

На основе выражения (13) можно легко рассчитать температуру вершины ребра, т. е. когда  $X=1$  или  $Z=(1+\alpha)\sqrt[3]{M^2}$ , которая представляет наибольший теплотехнический интерес. Подставляя в (18), получим

$$v(Z_1) = \frac{Ai(Z_1)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_1)}{Ai(Z_0)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_0)}. \quad (14)$$

Однако, учитывая, что числитель зависимости (14) равен постоянной величине, а именно

$$N = Ai(Z_1)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_1) = 0,31831,$$

решение (14) можно записать в более простой форме

$$v(Z_1) = \frac{N}{Ai(Z_0)Bi'(Z_1) - Ai'(Z_1)Bi(Z_0)}. \quad (15)$$

В качестве примера определим безразмерную температуру на конце ребра для трех случаев  $\alpha=0,5$ ;  $\alpha=0$ ;  $\alpha=-0,5$ .

Во всех трех вариантах примем  $m = 0,5$ .

В случае  $\alpha=0$  безразмерная температура вершины ребра определяется согласно [1] по простой зависимости

$$v(X=1) = \frac{1}{\operatorname{ch} m} = \frac{1}{\operatorname{ch} 0,5} = 0,8868. \quad (16)$$

При  $\alpha=0,5$  имеем  $Z_0 = \sqrt[3]{M^2} = 1$  и  $Z_1 = (1+\alpha)\sqrt[3]{M^2} = 1,5$  и следовательно тогда

$$v(X=1) = \frac{0,3183}{Ai(1)Bi'(1,5) - Ai'(1,5)Bi(1)} = 0,8539.$$

Если же  $\alpha=-0,5$ , то получим  $Z_0=1$  и  $Z_1=(1+\alpha)\sqrt[3]{M^2}=0,5$ .

Поэтому

$$v(X=1) = \frac{0,3183}{Ai(1)Bi'(0,5) - Ai'(0,5)Bi(1)} = 0,922.$$

Из сравнения полученных результатов видно, что чем интенсивнее снижается коэффициент теплоотдачи по длине теплоотдающего ребра, тем выше становится безразмерная температура его вершины. В результате повышения величины  $\alpha$  по длине стержня будет иметь место обратный эффект.

При условии, когда  $\alpha \rightarrow 0$  (т. е. коэффициент теплоотдачи по всей ребристой поверхности остается одинаковым), формула (15) преобразуется в выражение (16).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 461 с.
2. Абрамович М., Стигин И. Справочник по математическим функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
3. Смирнов А.Д. Таблицы функций Эйри и специальных вырожденных гипергеометрических функций для асимптотических

- решений дифференциальных уравнений второго порядка. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 261 с.
4. Фок В.А. Таблицы функций Эйри. – М.: Изд-во информ. отдела НИИ, 1946. – 54 с.

Поступила 20.08.2013 г.

UDC 536.24

### CALCULATION OF HEAT DISTRIBUTION IN ROD WITH VARIABLE HEAT IRRADIATION COEFFICIENT ON ITS SURFACE

**Yuri V. Vidin,**

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny avenue, 79. E-mail: roman.kazakov@list.ru

**Roman V. Kazakov,**

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny avenue, 79. E-mail: roman.kazakov@list.ru

*The analytical methods used for researching heat exchange processes in ribbed surfaces are based on assumption, that heat exchange coefficient is constant. But in real conditions this coefficient is variable, because of changes in thermal field along the rib. The authors have proposed the mathematical method for calculating heat distribution along the rib with constant cross-section for case, when heat transfer coefficient on rib surface depends on longitudinal coordinate. The solution obtained is based on special Airy function. When using the recommended theoretical method the authors eliminated the assumption, that heat transfer coefficient is constant on whole ribbed surface.*

#### Key words:

*Rib, heat convection coefficient, Airy function, temperature field, analytical approach.*

#### REFERENCES

1. Kern D., Kraus A. *Razvitye poverkhnosti teploobmena* [The developed heat exchange surfaces]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 461 p.
2. Abramovich M., Stigin I. *Spravochnik po matematicheskim funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Moscow, Nauka, 1979. 830 p.
3. Smirnov A.D. *Tablitsy funktsii Eyri i spetsialnykh vyrozhdennykh gipergeometricheskikh funktsiy dlya asimptoticheskikh resheniy differentsialnykh uravneniy vtorogo poryadka* [Tables of Airy functions and special confluent hypergeometric functions for asymptotic solutions of second order differential equations]. Moscow, AN SSSR publ., 1955. 261 p.
4. Fok V.A. *Tablitsy funktsiy Eyri* [Tables of Airy functions]. Moscow, Informatsionny otdea NII, 1946. 54 p.

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И МАЛОЗАТРАТНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ УГОЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПОД ВИХРЕВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ СЖИГАНИЯ

Саломатов Владимир Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. Института теплофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1.

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

*Подведены некоторые итоги экспериментального и численного моделирования вихревых топочных процессов и эмиссии токсичных выбросов при сжигании низкокачественных углей в парогенераторе с вихревой топкой Н.В. Голованова. Исследования турбулентной аэродинамики вихревых топок на физических и математических моделях дали возможность установить их основные габаритно-компоновочные соотношения, а результаты моделирования лучистого теплообмена, горения топлива, химкинетики образования токсичных выбросов явились базовой информацией по определению их энергоэкологических параметров. Выполненный на современном уровне комплекс научно-исследовательских работ позволил выработать рекомендации по дальнейшему усовершенствованию конструктивных и режимных характеристик парогенератора с вихревой топкой на березовском угле Канско-Ачинского бассейна, а также лег в основу проектов реконструкции котла ТП-87 на кузнецких углях и БКЗ-320 на березовском угле.*

### Ключевые слова:

*Энергетика, уголь, парогенератор, экология, реконструкция, вихревая топка, турбулентная аэродинамика, тепломассоперенос, тепловое излучение, токсичные выбросы.*

### Введение

В настоящее время одно из основных направлений развития в теплоэнергетике при сжигании низкосортных топлив [1–4] – создание энергоэффективного и экологически чистого оборудования с выбросом в окружающую среду минимума: летучей золы, оксидов серы, азота и других токсичных продуктов сжигания. Наиболее вредным газовым компонентом является  $\text{NO}_x$ , уровень которого существенно зависит от термических и аэродинамических процессов в топке. Основной же вклад в суммарные выбросы оксидов азота при сжигании углей сибирских месторождений вносят термические  $\text{NO}_x$ . Из технологических методов снижения термических  $\text{NO}_x$  в топке наименее затратным выступает многоступенчатый подвод окислителя. Но это не единственный способ уменьшения их выхода. Есть другой, весьма экономичный – за счет чисто аэродинамических приемов, например, закручиванием потоков. Это одно из обстоятельств, почему закрученные течения лежат в основе современных топочных устройств. К таковым относятся: тангенциальная топка, топка с горизонтальным вихрем, кольцевая топка, циклонная топка, топка с циркулирующим кипящим слоем и др. В последние годы низкотемпературный вихрь нашел широкое применение и в котлах стационарного кипящего слоя малой мощности для закрутки газодисперсного потока в надслоевом пространстве с целью успешного сжигания «тяжелых», прежде всего, топлив. Соотношение аэродинамических и химических временных масштабов процесса горения, определяемое параметром Дамкелера ( $Da$ ), значительно влияет на образование термических  $\text{NO}_x$  в процессе сжигания. Чем ниже  $Da$ , тем меньше выход термических  $\text{NO}_x$  [5]. Эти положения реализуются и в конструкции вихревой топки (ВТ), разработанной Н.В. Головановым

с сотрудниками. Она пригодна для сжигания газообразных, жидких и широкого ряда твердых топлив (в режиме жидкого шлака) и востребована для решения поставленных проблем.

В камере горения этой топки процесс сжигания протекает при повышенных объемных теплонапряжениях, которые обеспечивают жидкотекучее состояние шлаку. В таких топках интенсивный процесс ассимиляции оплавленных золотых частиц гарнисажным слоем шлака увеличивает шлакоулавливание и уменьшает унос из нее «летучей» золы. В верхней части топки (камера охлаждения), где располагаются топочные экраны открытого типа, газы и зола охлаждаются интенсивно, что позволяет избежать их зашлаковывания.

Перечислим основные преимущества вихревого сжигания:

- возможность работы на широкой гамме топлив;
- высокие объемные теплонапряжения, что гарантирует непрерывное жидкое шлакоудаление (ЖШУ);
- значительный коэффициент шлакоулавливания за счет центробежного эффекта;
- масса циркулирующего топлива находится во взвешенном состоянии, что существенно ускоряет тепломассообменные процессы;
- топливо, многократно вращаясь, успевает газифицироваться и постепенно выгорает, что придает процессу горения определенную устойчивость;
- наличие устойчивого высокотурбулентного закрученного потока, что стимулирует более быструю доставку кислорода, а следовательно, уменьшение коэффициента избытка воздуха;
- увеличение «технологического» времени пребывания частиц топлива за счет закрутки газодисперсной среды в рабочем пространстве;



- уменьшенные габаритные размеры топочных объемов за счет применения форсированной камеры горения;
- возможность удерживать значительный запас топлива в топке;
- практически изотермические условия в камере горения;
- улучшенные экологические параметры горения, главным образом, за счет сниженного коэффициента избытка воздуха.

Недостатки вихревого сжигания:

- тяжелые условия работы огнеупорного покрытия вследствие его взаимодействия с агрессивным шлаком;
- жесткие требования по поддержанию оптимальной температуры в камере горения для придания требуемой вязкости жидкому шлаку.

Из перечисленного следует, что вихревой перенос является аэродинамической основой всего процесса сжигания в таких топочных устройствах. Основная роль аэродинамической структуры вихревого потока – совершенное смесеобразование газифицированного топлива и окислителя, без чего невозможно достигнуть ни требуемой интенсивности процессов, ни допустимых показателей по вредным выбросам, ни высокого уровня экономичности сжигания. Объектом исследования является парогенератор с вихревой топкой (ПВТ) Н.В. Голованова. К настоящему времени проведен обширный комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ применительно к топочным устройствам такого типа. Анализ работ, выполненных ранее сотрудниками НПО ЦКТИ [1–3], исследователями из Сибтехэнерго, Новосибирскэнерго, Томского [4], Ленинградского политехнических институтов и других организаций применительно к вихревой топке, свидетельствует о недостаточной изученности в ней сложной структуры закрученных потоков, особенно таких эффектов, как присоединение факела к одной из поверхностей нагрева (явление Коанда), прецессия вихревого ядра, вторичные течения, рециркуляционные зоны, что не позволяет перейти на новой научной основе к созданию перспективных котельных агрегатов с вихревой технологией сжигания. По сравнению с применявшимися в этих публикациях методами исследования, на сегодня налицо прогресс в развитии уникальных измерительных систем, компьютерных 3-D расчетов, что на данном этапе дает возможность получать недоступную ранее детальную информацию по параметрам турбулентного закрученного течения, теплообмена, горения, эмиссии токсичных выбросов и другие характеристик практически в любой точке пространства топочной камеры. Результаты же физического и математического моделирования являются основой для выбора конструктивных и режимных параметров для создания новых котлов и реконструкции функционирующих под вихревую технологию сжигания с вихревыми топками.

Ниже освещены итоги решения на современном уровне сформулированных проблем.

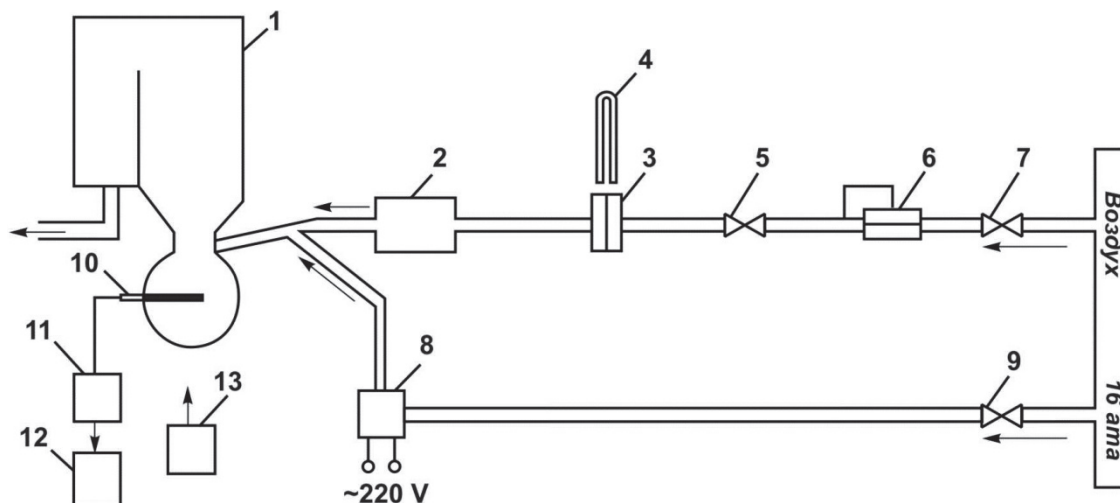
#### Физическое моделирование топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Детальные экспериментальные исследования рабочих процессов в ПВТ служат источником новых знаний и закономерностей, благодаря которым целенаправленно оптимизируются режимные и конструктивные параметры ВТ. Они также служат основой для верификации математических моделей топочных процессов, которые без экспериментально вводимых коэффициентов и зависимостей не обеспечивают должную адекватность и информативность последних.

К данному моменту наибольшие усилия нами были затрачены на проведение аэродинамического эксперимента в моделях ПВТ. Экспериментальная часть работы реализуется программой исследований на воздушной (масштаб 1:15) и гидравлической (масштаб 1:30) моделях, геометрически подобных одной секции опытно-промышленного котла с вихревой топкой ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3. Обе модели выполнены из органического стекла. На фронтальной стенке под углом  $15^\circ$  симметрично расположены два прямоугольных сопла. При моделировании был выдержан параметр  $\Sigma f/F_T$ , являющийся постоянным для данного типа ПВТ, где  $\Sigma f$  – сумма площадей сечения горелок,  $F_T$  – площадь диаметрального сечения камеры горения (КГ).

Экспериментальные исследования топочных процессов представляют собой сложную проблему, поэтому вынуждены ограничиться результатами изотермического моделирования аэродинамики с использованием лишь одного определяющего критерия подобия – числа Рейнольдса (Re). Последнее может быть оправдано, с одной стороны, тем, что аэродинамика «горячего» течения качественно повторяет картину «холодного» [6]. С другой стороны, в лабораторных условиях по правилам подобия число Re на порядок выше, чем в реальном объекте, но, учитывая наличие автомодельности течения относительно числа Рейнольдса в диапазоне значений  $Re=10^4-10^6$  [6], можно здесь применить приближенное моделирование

На воздушной модели (рис. 1) был выполнен основной объем эксперимента по измерению средних скоростей и интенсивности турбулентных пульсаций с использованием двухканального термоанемометра АТА-03 постоянной температуры с линеаризатором и датчиков с прямой и наклонной нитью. Проводились также измерения с помощью тепловизионной системы ТВ-М. С целью измерения скоростей твердых частиц и их концентраций по сечению топочного объема использована лазерно-доплеровская диагностика на волоконных датчиках, а также «время-пролетная» методика с применением двойного оптико-волоконного зонда, разработанные в ИТ СО РАН.



**Рис. 1.** Схема стэнда для исследования аэродинамики и теплообмена в моделях ПВТ с вихревой топкой: 1 – модель ПВТ с вихревой топкой; 2 – ресивер; 3 – расходомер; 4 – U-образный манометр; 5, 9 – вентиль; 6 – редуктор; 8 – электронагреватель; 10 – датчик термоанемометра; 11 – термоанемометр; 12 – ПЭВМ; 13 – тепловизор и видеокамера

### Визуализация течений в моделях ПВТ

Визуализация течений осуществлена в гидравлической модели ПВТ с помощью микропузырьков воздуха с подачей последнего в поток на входе в центробежный насос. За счет «подсветки» лазерным излучением («лазерный нож») и с помощью видеотехники фиксировалась структура течения в заданном сечении камеры горения и камеры охлаждения. Также использовалась при визуализации течения подкраска жидкости. Применялся на воздушной модели ультрадисперсный порошок (рис. 2).



**Рис. 2.** Визуализация течения в модели ПВТ с помощью ультрадисперсных порошков

В результате визуализации выявлены «аномальные» свойства закрученных потоков в модели ПВТ: вторичные течения, прецессирующее вихревое ядро, наличие «рециркуляционных» (противопоточных) зон, эффект Коанда (прилипание струй к одному из топочных экранов) и др.

### Термоанемометрические измерения

Исследование аэродинамических характеристик ВТ с помощью термоанемометра проведено на стенде (рис. 1). Длина модели (размер по z-координате) составляла 32 см, диаметр 30 см. Воздух в модель подводился через две горелочные амбразуры, симметрично расположенные в модели; расстояние по z-координате от передней стенки до первого сопла составляло 4 см. Размеры сопел (см): 5,2 (по вертикали), 4 (по горизонтали); угол наклона сопла к горизонтали  $\gamma=15^\circ$ . Число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру модели, составляло  $10^6$ . Термоанемометрические измерения (ТА) проводились по горизонтальной прямой вдоль оси, лежащей по вертикальной плоскости, проходящей через середину сопла. Среднерасходная скорость воздуха через сопла составляла до 50 м/с. В работе использовались: датчики с прямой и наклонной нитью длиной 1,5 мм и диаметром 7 мкм. Тарировка и определение коэффициентов чувствительности датчиков выполнялись на тарировочном сопле; скорость течения воздуха через сопло измерялась с помощью трубки Пито–Прандтля.

Проведена совместно с А.В. Кейно [7] оригинальная модификация ТА-метода измерений с прямым и наклонным датчиками, суть которой состоит в раздельном определении касательных компонент тензора напряжений по данным четырех измерений пульсационной компоненты сигнала датчиком с прямой нитью (т. е. с нитью, перпендикулярной оси вращения датчика) при двух известных компонентах скорости. Измерение остальных четырех компонент тензора турбулентных напряжений осуществляется по данным найденной пульсационной компоненты для датчиков с прямой и наклонной нитью. Проведение измерений по вышеописанной методике не налагает требований малости одной или двух компонент средней скоро-

сти по отношению к третьей, т. е. позволяет при измерениях ограничиваться поворотами датчиков термоанемометра только в одной плоскости и допускает при выполнении вышеуказанных условий определять компоненты тензора турбулентных напряжений с хорошей точностью.

Измерения показывают (рис. 3), что осевая компонента скорости трижды меняет знак. Отрицательное значение можно объяснить тем, что входная струя в этом сечении продолжает равномерно распределяться в осевом направлении. Максимумы осевой компоненты скорости на периферии, отрицательный минимум в центре вихря образуются вследствие протекания воздуха в области пограничного слоя на торцевой стенке из зоны повышенного давления на периферии в зону пониженного давления в центре вихря. Радиальная компонента скорости в левой части продольного сечения модели имеет положительную направленность к боковой стенке, что, по-видимому, также связано с перераспределением входной струи в радиальном направлении. В правой части диаметра сечения модели радиальная компонента скорости направлена от стенки, вследствие обтекания потоком выступа на выходе из вихревой зоны.

На рис. 4 представлены данные измерений турбулентных характеристик течения на модели ВТ.

Уровень кинетической энергии турбулентности имеет максимум у левой стенки модели, что, с большой вероятностью, вызвано «размыванием» входной струи, создающей закрутку потока. По направлению к правой стенке интенсивность кинетической энергии турбулентности уменьшается. Такая быстрая ламинаризация течения вызвана, по-видимому, положительным градиентом давления, возникающим при течении вдоль вогнутой стенки. Локальный максимум кинетической энергии турбулентности в приосевой зоне может указывать на наличие пульсаций вихревого ядра в этой области. Экспериментальные данные показы-

вают значительную анизотропию всех аэродинамических характеристик, в частности, как самих напряжений Рейнольдса, так и их пространственных распределений.

Измеренные профили компонент скоростей и соответствующих пульсационных составляющих позволяют сделать следующие выводы:

- средняя составляющая азимутальной компоненты скорости имеет максимум напротив выхода горелки, а профиль пульсационной компоненты скорости при том же положении имеет минимум, что позволяет сделать вывод о струйном характере истечения воздуха из горелки;
- при разных числах Рейнольдса видно, что течение автомодельным не является;
- помимо преимущественно азимутального движения на периферии наблюдается циркуляция вдоль оси камеры сгорания;
- профиль азимутальной компоненты скорости в камере горения является устойчивым и близким к осесимметричному;
- профиль тангенциальной компоненты скорости представляет собой потенциальный вихрь;
- профили радиальной и осевой компонент скорости имеют сложную структуру, что связано с перераспределением входной струи в радиальном направлении и осевой рециркуляцией потока;
- на выходе потока из вихревой зоны происходит его быстрая ламинаризация;
- относительная величина максимума зависит как от среднерасходной скорости через горелки, так и от относительной ширины горелок, причем «дальнобойность» струи увеличивается с увеличением среднерасходной скорости; максимум средней скорости сопровождается максимумами пульсационных компонент скорости, что указывает на интенсивное турбулентное перемешивание по краям струи, и менее интенсивное в центре;

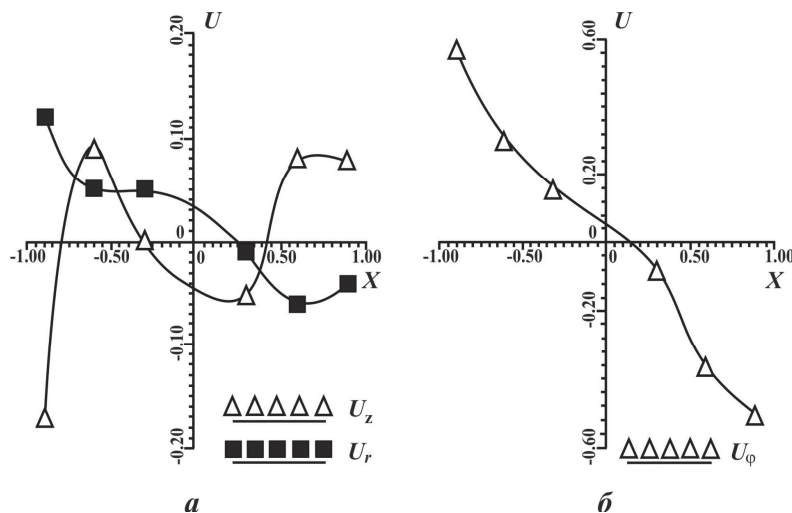


Рис. 3. Экспериментальные профили радиальной, осевой и тангенциальной компонент скорости при входной скорости потока 50 м/с. а) профили радиального и осевого компонента скорости; б) профиль тангенциального компонента скорости



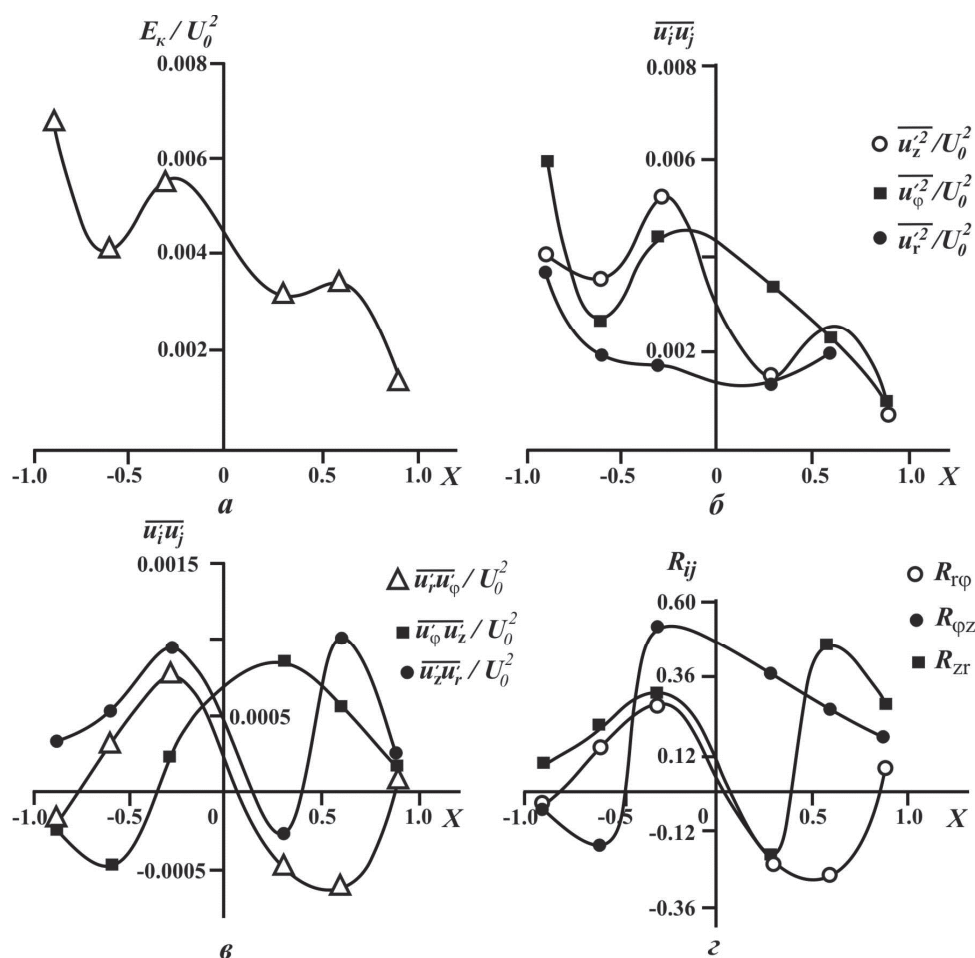


Рис. 4. Распределение кинетической энергии турбулентности (а), нормальных (б), касательных (в) напряжений и корреляционных коэффициентов (г)

- аэродинамика вихревой части топки Н.В. Голованова устойчива; профили окружной компоненты скорости слабо меняются при изменении среднерасходной скорости воздуха в пределах 15–175 м/с,  $Re=10^3-10^6$  и при изменении безразмерной ширины горелок (отношение ширины к диаметру камеры) в пределах 0,20...0,33;
- относительно высокий коэффициент сохранения окружной скорости, равный 0,76, создает условия для интенсивного перемешивания по всему объему топки;
- течение в диффузорной части носит «перчаточный» характер; вынос происходит в плоскости симметрии между амбразурами горелок;
- в камере охлаждения в зависимости от режимных параметров формируется сложное пространственное движение; в большинстве исследованных режимов поток существенно неравномерен как по длине, так и по высоте.

На фронтальной стенке имеется область возвратных токов. Ассиметричная картина течения приводит к значительной неравномерности поля течения. В камере охлаждения имеются области, где скорости по абсолютной величине в несколько раз превышают среднерасходную. По по-

перечному сечению камеры охлаждения присутствуют как вертикальные, так и горизонтальные вихри.

Из вышеперечисленных особенностей турбулентной аэродинамики вихревой топki ЦКТИ можно сделать следующие выводы.

1. Область зажигания определяется главным образом дальностью струи и аэродинамическим режимом. Следовательно, изменяя положение области зажигания, можно обеспечить требуемый прогрев топлива и выход летучих до его зажигания, что уменьшает уровень выбросов топливных  $NO_x$ .
2. Большая окружная компонента скорости на периферии камеры сгорания создаёт вынос горячего на стенки, вследствие чего горение происходит в основном в пристеночной области, что исключает локальные максимумы температуры. Это, как известно, приводит к уменьшению выбросов «термических»  $NO_x$ .
3. Хорошее перемешивание во всем объёме камеры сгорания, являющееся следствием высокого среднего уровня турбулентных пульсаций, позволяет сжигать низкокачественный уголь при низких коэффициентах избытка воздуха.

Указанные особенности аэродинамики турбулентного потока в вихревой топке необходимо учитывать при проектировании топков данного класса.

#### Тепловизионные измерения

Блок-схема эксперимента представлена также на рис. 1 Лицевая стенка вихревой камеры модели топки изготовлена из стали 12Х18Н10Т толщиной 1,5 мм и зачернена снаружи порошком от копировального аппарата, разведенным клеем 88. Спутный поток воздуха, нагретого до 100 °С, смешивается с основным потоком на последнем прямолинейном участке впускного трубопровода.

Тепловизионная система ТВ-М может устанавливаться в двух положениях: напротив стенки модели; либо сверху так, что объектив направляется на сетку внутри модели через прорезь в стенке. В последнем случае внутри модели располагается сетка из нержавеющей стали перпендикулярно оси объектива на высоте интересующего нас сечения потока. Замену стенок и прорези приходится делать из-за непрозрачности оргстекла в диапазоне длин волн больше 1 мкм.

Калибровка тепловизионной системы осуществляется по термоклину. В экспериментах получено множество термограмм лицевой стенки и сетки, установленной в наиболее интересующей нас части модели, – горловине. Условия экспериментов отличались скоростью основного потока. В результате экспериментов установлена количественная связь между соответствующей скоростью и температурой поверхности стенки или сетки, определяемой по термограмме. Следует подчеркнуть, что тепловизионный метод исследования аэродинамики сложных пространственных течений применен впервые.

В итоге [8] предложен и реализован панорамный тепловизионный метод, состоящий в том, что к основному потоку подмешивается горячий воздух, а с торцевой стенки модели из оргстекла, замененного на сталь, снимается термограмма. Для определения поля скоростей в произвольных сечениях потока используется металлическая сетка. Распределение температур на ИК-изображениях стенки и сетки качественно совпало с предполагаемым распределением скоростей потока.

#### Численное моделирование топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Совместно с Д.В. Красинским, А.Д. Рычковым [9] предложена пространственная математическая модель топочных процессов, включающая процессы течения, теплообмена, горения, теплового излучения, генерацию оксида азота. Результаты вычислительного эксперимента для вихревой топки показали, что предложенная модель успешно объясняет экспериментальные наблюдения. Сконструирована система уравнений химически реагирующего турбулентного газодисперсного течения, записанная в тензорном виде в форме законов сохранения массы, количества движения, энтальпии

и концентрации компонентов для обеих фаз в соответствии с эйлеровым двухскоростным и двухтемпературным описанием.

Принимается модель течения монодисперсной газовой смеси, когда угольные частицы в процессе химических превращений считаются твердыми сферами постоянного размера в соответствии с гипотезой жесткого «золотого каркаса». Скорости химических реакций и их тепловые эффекты описываются через источниковые члены в правых частях соответствующих уравнений. Система замыкается уравнениями переноса плотности энергии излучения и модифицированной  $k$ - $\varepsilon$  моделью турбулентности (вместе с уравнением переноса  $k_{ts}$  для дисперсной фазы), а также выражениями для коэффициентов межфазного взаимодействия, коэффициентов турбулентного и диффузионного переноса и других параметров. В выражении для времени релаксации частиц учтены изменения плотности частиц при выгорании и зависимость вязкости от температуры, а также поправка на стесненность обтекания частиц. Описана постановка граничных условий. Для определения  $k$ ,  $\varepsilon$  и турбулентного теплового потока на стенках вихревой камеры используется метод пристеночных функций; для уравнения переноса радиационной энергии – известные граничные условия Маршака. При этом плотность частицы уменьшается при снижении ее массы в процессе выхода летучих и конверсии углерода. Для осреднения нестационарных пространственных уравнений переноса импульса, энергии, концентраций компонентов используется метод Фавра для несущего газа, а для дисперсной фазы – кинетические уравнения для функции распределения плотности вероятности скорости и температуры частиц в турбулентном потоке. Далее для расчетов используется комплексная модель пространственного турбулентного течения с горением распыленного угля, построенная на базе рассмотренных выше частных моделей. Состав газовой фазы представляется в виде компонентов  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ , энтальпия и теплоемкость которых вычисляются как полиномы от температуры газа. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии находятся по эмпирическим степенным зависимостям от температуры. На входе в топку уголь считается подсушенным; содержание золы в частицах в топочном процессе полагается постоянным. Принимается, что в процессе термической деструкции угля летучие уходят в газовую фазу в виде паров  $CH_4$ ,  $CO_2$ , и  $H_2O$ , при этом массовые доли этих компонентов определяются через заданные содержания кислорода, водорода и углерода летучих в исходном топливе.

Рассмотрены физические представления и математические модели для описания всех характерных явлений физико-химического реагирования и теплообмена при горении пылеугольного топлива. Прежде всего, разработаны модели процессов горения частиц натурального твердого топлива. Охарактеризован состав угля и определяющие

стадии его превращений при горении: пиролиз и выход летучих веществ, газофазное сгорание углеводорода летучих, реагирование твердого углерода кокса с газовыми компонентами. Стадийность этих процессов, которые описываются на уровне брутто-реакций, обеспечивается в уравнениях сохранения массы и энергии автоматически ввиду зависимости скорости каждого процесса от температуры и концентрации реагентов. Для описания скорости гетерогенного горения углерода привлекаются результаты диффузионно-кинетической теории, разработанной в трудах Л.Н. Хитрина, А.С. Предводителя и др. Динамика пиролиза летучих также описывается на основе диффузно-кинетических соотношений. Для выражения скорости газофазного сгорания выделившегося углеводорода используется модель дробления турбулентных вихрей. Также рассмотрены модели переноса излучения в топочной среде, которая считается оптически серой. Принят диффузионный метод ( $P_1$  – приближение метода сферических гармоник) для излучающей, поглощающей и рассеивающей двухтемпературной среды. При этом коэффициенты поглощения в газовой фазе (учет вклада трехатомных газов) вычисляются по соотношениям модели взвешенной суммы серых газов, а для определения коэффициентов поглощения и рассеяния в дисперсной фазе используется асимптотическое приближение теории Ми для оптически крупных шероховатых частиц.

Проведено моделирование образования окислов азота, что необходимо для численной оценки экологических характеристик топочного процесса. Приведена достаточно подробная и вместе с тем компактная модель, основанная на распространенной брутто-схеме Митчелла–Тэрбелла [10], в которой учтены как «термические» механизмы образования  $\text{NO}_x$  по Я.Б. Зельдовичу, так и «топливные» с привлечением схемы «четырех центров» Гейнса ( $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$ ) [11].

#### Результаты компьютерного моделирования топочных процессов в парогенераторах с вихревой топкой

Для рассматриваемого класса задач о трехмерных течениях с малыми дозвуковыми скоростями широкое распространение получили методы типа SIMPLE [12] – полунейного метода для связанных через давление уравнений, предложенного Патанкаром и Сполдингом. Установление решения достигается в ходе глобальных итераций, на каждом уравнения решаются отдельно одно от другого, что упрощает применение методов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Проведена конечно-разностная аппроксимация уравнений переноса в SIMPLE, основанная на методе контрольных объемов с использованием шахматной сетки, в которой узлы для компоненты скорости сдвинуты относительно основных узлов для скалярных величин. При построении декартовой сетки возле криволинейной границы узлы для

компонент располагаются непосредственно на стенках, а центр контрольного объема лежит внутри области. При аппроксимации конвективных и диффузионных членов уравнений используется модификация противоточной схемы – схема «пятой степени» Патанкара. Достоинствами схемы является безусловная устойчивость и потому хорошая сходимость решения, а также простота реализации.

При построении разностных аналогов учитывается условие неотрицательности источниковых членов. Предложено использовать модификацию известного алгоритма SIMPLE, в которой шаг по времени выбирается постоянным. Эта модификация распространена, по-видимому, на случай течения с учетом переменной плотности и химического реагирования, когда в уравнении неразрывности необходимо учитывать член  $\partial\rho/\partial t$  и источниковый член межфазного массообмена. Приведена постановка граничных условий для уравнения для поправок к давлению, при этом значения  $\nabla p$  на открытой границе (выходе) определяются из условия интегрального по всему объему баланса расхода. Предложенный вариант алгоритма обеспечивает надежную сходимость глобальных итераций метода и не требует введения параметров нижней релаксации. Рассмотрены алгоритмы решения разностных уравнений эллиптического типа (это уравнение для поправок к давлению в алгоритмах типа SIMPLE, уравнение для плотности энергии излучения) на основе метода неполной факторизации Н.И. Булеева, являющегося высокоэффективным алгоритмом итеративного решения СЛАУ большой размерности. Для ускорения сходимости методов неполной факторизации в данной работе предложено использовать метод сопряженных невязок, который обладает свойством монотонности и дает несколько более высокую скорость сходимости на начальном участке итераций, что важно при реализации алгоритма в общем контексте метода установления типа SIMPLE. Приведен вывод расчетных формул такого алгоритма на основе обобщенного метода сопряженных направлений по А.А. Самарскому, выведен критерий остановки итерационного процесса. Таким образом, использованное в работе сочетание метода сопряженных минимальных невязок с предобуславливающим явным методом неполной факторизации Булеева обеспечило высокую эффективность решения разностных уравнений Пуассона, что позволило существенно сократить время счета в целом.

Из результатов моделирования аэродинамики однофазного течения в ВТ в изотермической постановке следует, что негативный эффект Коанда исчезает при относительной ширине горловины диффузора, равной 0,4. Из анализа полей скорости следует, что закрученный поток в камере горения имеет в общем устойчивую и существенно пространственную структуру со значительным изменением положения центра вихря по аксиальному направлению. Характерные распределения основ-

ных аэродинамических параметров: давления, компонент скорости, турбулентной вязкости, свидетельствуют о сложном, существенно трехмерном характере аэродинамики ВТ.

Выполнено также моделирование двухфазного монодисперсного течения в ВТ в изотермической постановке. Рассматривались частицы диаметром: 40, 90, 200 мкм, при этом соответствующие числа Стокса следующие:  $S_{th}=\{0,02, 0,101, 0,5\}$ . В случае более инерционных частиц ~200 мкм наблюдается их скопление вблизи стенок камеры под действием центробежных сил. Эффект накопления частиц приводит к существенному повышению давления в нижней части камеры горения ВТ. Для менее инерционных частиц порядка 90 мкм этот эффект мало заметен, а в случае  $S_{th}\ll 1$  частицы полностью следуют за несущим газом, что подтверждено в расчетах для 40 мкм.

Проведено также моделирование процессов сжигания распыленного угля Кузнецкого Г и Березовского Б в ВТ. Расчеты проводились для монодисперсных частиц размерами 40 и 90 мкм. При этом показано, что в реальной полидисперсной системе фракция 40 мкм может считаться «представительной» для характерной тонины помола угля  $R_{90}=25\%$ .

Основным аэродинамическим отличием течения с горением является эффект теплового расширения потока, приводящий к увеличению скорости течения из-за снижения плотности газа по уравнению состояния. Вместе с тем все качественные особенности аэродинамики ВТ (в т. ч. и структура течения) сохраняются и для течения с горением. Прогрев входной струи происходит в процессе ее взаимодействия с горячим закрученным потоком в камере горения и обуславливает интенсивные процессы выхода летучих из твердой фазы и сгорания углерода летучих. Как показали расчеты, на скорость выхода летучих для частиц размером 90 мкм и менее основную роль при  $T < 10^3$  К оказывает кинетический режим реакции, а при  $T > 10^3$  К становится важным диффузионный режим.

Из расчетов следует, что зона максимальных концентраций образующегося метана находится в струе сразу после зоны окончания выхода летучих из твердой фазы. Тепловыделение при сгорании метана в этой зоне способствует зажиганию углерода коксового остатка. Резкое возрастание температуры частиц на участке входной струи  $x > 0,6$  свидетельствует о начале интенсивного горения углерода кокса при  $T > 1500$  К. В этой области также существенно проявляется температурное скольжение фаз, достигающее  $\Delta T \approx 1000$  К. В камере охлаждения температура потока падает, причем основным механизмом отвода тепла в экранные поверхности является, как показали расчеты, радиационный теплоперенос, при этом отмечена принципиальная важность учета механизма радиационного теплопереноса для адекватного моделирования топочных процессов в ВТ.

При этом отводимая экранными топочными поверхностями тепловая мощность при сжигании кузнецких углей составила до 15 % от мощности химического энерговыделения. Показано, что в целом температурная неравновесность фаз проявляется заметнее, чем скоростная.

Выгорание углерода в частицах 40 и 90 мкм протекает так, что конверсия углерода для 40 мкм почти полностью происходит в камере горения, в то время как более крупные частицы (90 мкм и выше) догорают еще и в диффузоре. Дана оценка значения механического недожога  $q_4$ , которая для 90 мкм составляет  $q_4=3,89\%$ , в то время как для «представительной» фракции 40 мкм –  $q_4=0,006\%$ . Получены важные для оценки теплотехнических характеристик топочного процесса распределения температуры экранных поверхностей, падающего и воспринятого радиационных тепловых потоков и коэффициента тепловой эффективности экранов. Полученные в расчетах значения коэффициентов тепловой эффективности «чистых» топочных экранов хорошо соответствуют диапазону 0,39–0,48 его значений по опытным данным.

Представленная информация об аэродинамических и тепловых полях дополняется полями концентраций газовых компонентов. С целью оценки характеристик топочного процесса проведено моделирование образования оксидов азота в ВТ [13]. Как показали расчеты, основную роль в образовании  $\text{NO}_x$  играют реакции:

- 1) выхода азота летучих в виде HCN, его превращения в  $\text{NH}_3$  и затем в NO («топливные»  $\text{NO}_x$ );
- 2) «термические» реакции диссоциации воздуха, дающие около 50 %  $\text{NO}_x$  из-за высокотемпературного режима в камере сжигания;
- 3) реакция поглощения NO на углероде коксовых частиц.

Полученные значения приведенной к  $\text{NO}_2$  концентрации на выходе из ВТ составили: 310 мг/нм<sup>3</sup> для кузнецкого и 402 мг/нм<sup>3</sup> для березовского угля. Эти значения хорошо согласуются с уровнем  $[\text{NO}_x]=360$  мг/нм<sup>3</sup> экспериментальных измерений. Таким образом, впервые для ВТ Н.В. Голованова численно исследована полная картина газодинамических и тепловых процессов в топочном объеме. При этом полученные значения основных теплотехнических и экологических характеристик ВТ соответствуют данным опытно-промышленных испытаний.

Выполненные комплексные исследования рабочих процессов в вихревой топке позволяют надежно конструировать высокоэффективные топки со сниженными выбросами окислов азота, летучей золы, бенз (а) пирена и др. На вновь проектируемых ТЭС использование котлоагрегатов с вихревой топкой позволяет значительно сокращать габариты главного корпуса и тем самым снижать капиталовложения. При этом пылесистема создается в соответствии с требованиями вихревой технологии – она должна быть замкнутой. Эти требования не предполагают изменений самой схемы ТЭС и рабо-



чих параметров. Таким образом, для проектируемых ТЭС технология с вихревой топкой имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной технологией, и что важно для настоящего времени – она является менее затратной.

Результаты физического и математического моделирования, опытных сжиганий явились основой для выбора конструктивных и режимных параметров при создании новых котлов с вихревой топкой. Прежде всего, это данные по геометрии и размерам вихревой камеры, уровню рабочих температур, предельных скоростей, токсичных выбросов, интенсивностей смешения, теплонапряжений внутри топочного объема и на поверхностях нагрева и др. Выполненные комплексные исследования позволили выработать целый ряд научно-технических рекомендаций по конструированию:

- площадь выходного сечения диффузора должна составлять ~40 % диаметального сечения камеры горения;
- углы скатов диффузора: ~20° переднего и заднего ~30°;
- сброс сушильного агента необходимо осуществлять через амбразуры, расположенные над основными горелками;
- угол наклона осей горелок ~15° к горизонту;
- отношение площади горелочных амбразур к площади диаметального сечения ~5 %;
- отношение ширины одного модуля топочной камеры к её условному диаметру составляет 1,5.

#### **Научные принципы малозатратной реконструкции функционирующих парогенераторов под вихревую технологию сжигания**

При реконструкции функционирующих ТЭС установка ВТ требует, *во-первых*, доводки самого парогенератора (ПГ) и, *во-вторых*, возможной переделки пылесистемы.

*Парогенератор БКЗ-320 на Новосибирской ТЭЦ-3 (НТЭЦ-3).* Парогенераторы БКЗ-320 оборудованы топками с ЖШУ и рассчитаны на сжигание назаровского бурого угля с проектной зольностью 9 %. Главной проблемой при эксплуатации этих парогенераторов является интенсивное шлакование конвективных поверхностей, что в условиях малоэффективной работы систем их очистки приводит к снижению нагрузки котла до 260–280 т/ч. При поступлении на угольный склад непроектного топлива возникают также затруднения с выходом жидкого шлака.

Учитывая, что на ТЭЦ идет поставка большой гаммы непроектных топлив и что эта ситуация далее будет только усугубляться, возникла необходимость реконструкции парогенератора БКЗ-320 в плане выбора типа топочного и горелочного устройств с целями обеспечения надежной и экономичной работы котла при сжигании топлив практически любого качества с минимальными выбросами оксидов азота.

В работе предложен вариант реконструкции БКЗ-320 под вихревую технологию сжигания с использованием результатов физического и математического моделирования и опытно-промышленных испытаний ТПЕ-427 и корпуса Б котла П-49 как наиболее подкрепленный экспериментально-теоретическими данными и техническими решениями.

В проект реконструкции по варианту вихревой топкой ЦКТИ с ЖШУ закладывается следующее:

- условный диаметр вихревой камеры принят 5,76 м (равен глубине топки БКЗ-320);
- ширина топочной камеры – 11,59 м по осям труб;
- углы раскрытия диффузора: переднего – 20°, заднего – 30°;
- площадь выходного сечения диффузора – 40 % от диаметального сечения камеры горения;
- площадь горелочных амбразур – 5 % от площади наибольшего сечения вихревой камеры;
- устанавливается на фронтальной стенке восемь прямоточных горелок под углом 15° к горизонту;
- сброс сушильного агента осуществляется через специальный канал горелки в верхней ее части;
- пыль от бункера к горелкам подается по системе транспорта пыли высокой концентрации;
- принята замкнутая система пылеприготовления с газовой сушкой топлива и одной ступенью пылеотделения в циклоне;
- предусмотрены один двухсветный экран, а также 20 ширм, образующих перегреватель первой и второй ступени;
- для обеспечения безшлаковочной работы котла устанавливаются системы очистки:

Перечислим основные достоинства варианта реконструкции котла БКЗ-320 под вихревую технологию сжигания низкозольного березовского угля.

- За счет установки двухсветных экранов и ширм обеспечивается минимальная температура газов на выходе из топки 1067 °С и номинальная нагрузка 320 т/ч.
- При такой температуре выходных газов, как показали расчетные исследования и опытные сжигания на ТПЕ-427, обеспечивается беспшлаковочный режим котла при нагрузке 320 т/ч. Последнее подтверждается опытом эксплуатации котла ТПЕ-427 на березовском угле, где была доказана длительная и надежная работа при существующих системах очистки на режимах до 360 т/ч. Стабилизация загрязнений при сжигании назаровского угля обеспечивалась при температуре газов на выходе до 1200 °С.
- Выбранный для тепловых расчетов коэффициент тепловой эффективности экранов 0,35 получен при работе ТПЕ-427 на березовском угле. Следует принять во внимание, что на ТПЕ-427 задняя поверхность топкой, включая топочные ширмы, не имеет очистки. В случае реконструкции БКЗ-320 под ПВТ вся топочная каме-

ра будет подвержена очистке, что приведет к дополнительному положительному снижению температуры газов на выходе.

- Будет достигнута высокая степень выгорания, т. к. по опыту на ТПЕ-427 в диапазоне нагрузок 360–420 т/ч при оптимальном избытке воздуха в 1,15 она составила 98,5 %.
- Размещение сбросных сопел для сушильного агента выше основных горелок обеспечивает, как это было проверено на стендах ИТ СО РАН, надежное его догорание в камере охлаждения.
- Уровень теплонапряжений в камере горения –  $0,78 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>, и в поперечном сечении –  $3,69 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, как показал опыт эксплуатации ТПЕ-427, обеспечивает надежный режим жидкого шлакоудаления в диапазоне нагрузок 0,4...1,0 Дн. Последнее, как было подчеркнуто ранее, обусловлено управляемой аэродинамической структурой газовых потоков, расположением зоны максимальных температур в районе шлаковой лётки, режимом избирательной сепарации минеральных компонентов при шлакообразовании в ПВТ.
- Выбранные углы раскрытия диффузора (на основе наших «продувок», опыта эксплуатации котла П-49 Назаровской ГРЭС) обеспечивают отсутствие шлаковых загрязнений на экранных поверхностях диффузора.
- Гарантируются на реконструированном котле БКЗ-320 значения выбросов NO<sub>x</sub> не хуже 240–300 мг/нм<sup>3</sup>, которые уже были достигнуты на котле ТПЕ-427 после замыкания пылесистемы при эксплуатационных избытках воздуха за водяным экономайзером 1,17...1,2. Обеспечение такого уровня NO<sub>x</sub> достигается за счет двухступенчатого сжигания пыли с подачей части ее в приосевую зону камеры горения с избытками воздуха 0,8...0,9, а также применением пыли высокой концентрации.
- Использование существующего топливо-пылезоло-оборудования без существенных переделок.
- Облегченная работа существующих электрофильтров за счет уменьшения протока летучей золы из-за увеличения коэффициента шлакоулавливания в топке до 50...60 %.

Вариант реконструкции функционирующего ПГ под вихревую технологию сжигания, как уже отмечалось, позволяет использовать как строительную часть котельной ячейки, так и существующие вспомогательные системы котельной установки. Это убедительно показывает рис. 5 по сопоставлению вариантов реконструкции котла БКЗ-320 НТЭЦ-3. Просматривалась замена топки этого котла с ЖШУ на ПВТ с ЖШУ и тангенциальную топку (ТТ) «Сибэнергомаш» с твердым шлакоудалением. Для достижения приемлемых значений мехнедожога при использовании ТТ не хватает высоты существующего здания, что требует заглубления низа топки и затрагивает систему гидрозолоудаления. К тому же невозможно использовать

существующее топливо-пылеприготовительное оборудование без технических переделок. Работа электрофильтров серьезно осложняется из-за увеличения потока летучей золы за счет снижения коэффициента шлакоулавливания. Более низкие температуры в ТТ ухудшают надежность и экономичность сжигания низкорекреационных углей. Возникает малая устойчивость вихревого движения в ТТ при отключении хотя бы одной горелки (эффекты прецессии вихревого ядра, Коанда).

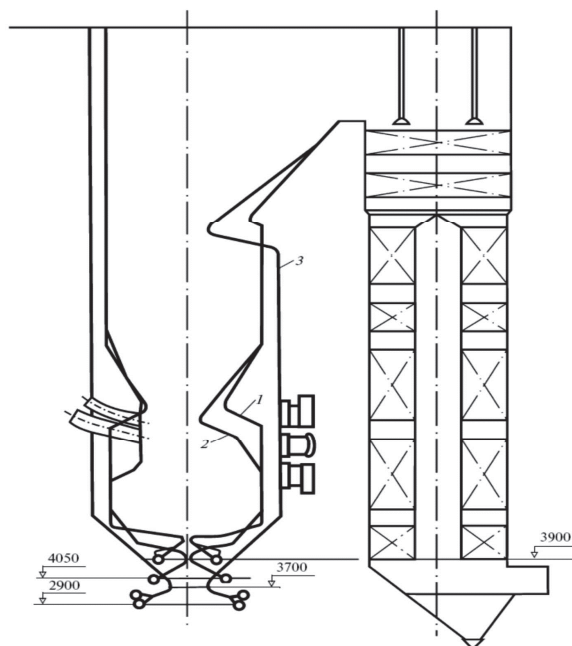


Рис. 5. Сопоставление вариантов реконструкции котла БКЗ-320 на вихревую топку ЦКТИ и тангенциальную топку («Сибэнергомаш»): 1 – БКЗ-320; 2 – вихревая топка ЦКТИ; 3 – тангенциальная топка («Сибэнергомаш»)

По этим причинам вариант реконструкции топки БКЗ-320 НТЭЦ-3 на ПВТ является предпочтительным.

Парогенератор ТП-87 Новокемеровской ТЭЦ (НКТЭЦ). Решение проблемы реконструкции парогенератора ТП-87 имеет большое значение, т. к. находящийся в эксплуатации в настоящее время парогенератор не удовлетворяет существующим санитарным нормам по выбросам окислов азота. Помимо неудовлетворительных экологических показателей ТП-87 (концентрация выбросов окислов азота более 1000 мг/м<sup>3</sup>), другой стороной проблемы является необходимость сжигания в одном и том же топочном устройстве различных по теплофизическим характеристикам видов кузнецких углей, что является сложной эксплуатационной задачей. Поэтому целью реконструкции является как существенное улучшение экологических характеристик, так и обеспечение возможности экономичного сжигания широкой гаммы различных по свойствам кузнецких углей. Поставленная задача, по нашим обоснованиям, может быть решена с наименьшими затратами путем замены топки ПГ ТП-87 на вихревую топку. В пользу этого варианта

говорит большой положительный опыт эксплуатации ВТ на ряде электростанций, в том числе Новосибирской ТЭЦ-3 и Назаровской ГРЭС, показавший достаточно высокие экологические и экономические характеристики, а также возможность сжигания широкой гаммы углей. Кроме того, данный вариант реконструкции использует имеющуюся на ПГ ТП-87 систему жидкого шлакоудаления и позволяет удачно вписаться в имеющиеся габариты реконструируемого ПГ.

Рассмотрим достоинства варианта реконструкции с использованием вихревой топки:

- обеспечение малых выбросов окислов азота за счёт управляемой аэродинамики и процесса горения; так, при сжигании берёзовского угля с тугоплавкой золой в котлах П-49 корп. 7Б и ТПЕ-427, модернизированных на ВТ с разомкнутой пылесистемой без применения каких-либо средств подавления  $\text{NO}_x$ , достигнуто содержание  $\text{NO}_x=400-500$  мг/м<sup>3</sup>; а после замыкания пылесистемы на котле ТПЕ-427 и применения двухступенчатого сжигания топлива при нагрузках 250–280 т/ч уровень  $\text{NO}_x$  составил 240–300 мг/м<sup>3</sup>, в то время как на соседних котлах с ЖШУ БКЗ-320–140ПТ при таких же нагрузках содержание  $\text{NO}_x$  было 500–600 мг/м<sup>3</sup>;
- надёжный выход жидкого шлака на ПВТ связан с управляемой аэродинамической структурой газовых потоков при изменении нагрузки и качества топлива, расположением зоны максимальных температур в районе шлаковой лётки;
- возможность высокотемпературного, более экономичного, по сравнению с низкотемпературной тангенциальной топкой с СШУ, сжигания низкорекреационных (особенно сибиргинских) кузнецких углей, когда даже значительного утонения помола недостаточно и дополнительно требуется более высокотемпературное сжигание;
- устойчивость вихревого движения в камере горения сохраняется при отключении даже двух горелок;
- возможность обеспечения в камере горения зон с избытком ( $\alpha > 1$ ) и недостатком ( $\alpha < 1$ ) воздуха;
- возможность секционирования топочного объёма, что позволяет эффективно управлять процессом горения;
- возможность использования существующего топливо-пылеприготовительного оборудования без существенных переделок;
- фронтальное расположение горелок и сбросных сопел значительно упростит компоновку воздушного тракта, пылепроводов сброса и ПВК, обеспечит удобство в обслуживании и ремонте;
- малые габариты ПВТ обеспечат значительную экономию котельного металла, работающего под давлением, и позволят удачно вписаться в существующие габариты каркаса реконструируемого ПГ ТП-87;
- существенно облегченные условия работы применяемых электрофильтров за счёт увеличения коэффициента шлакоулавливания в ВТ;

- возможность применения существующей системы гидрозолошлакоудаления;
- возможность использования систем очистки поверхностей нагрева от отложений;
- эффективное применение газоплотных экранных панелей;
- допустимый уровень эрозийного износа котельного металла;
- реализация системы подачи пыли высокой концентрации (ПВК);
- возможность использования золы и шлака, прошедших высокотемпературную обработку, в качестве материала с потребительскими свойствами.

При всех указанных выше достоинствах данного варианта реконструкции следует особо подчеркнуть, что вариант с ПВТ имеет длительный опыт эксплуатации на бурых углях КАБа, т. е. ВТ является отработанным топочным устройством, обеспечивающим надёжное сжигание широкой гаммы углей КАБа, в том числе и берёзовского угля с тугоплавкой золой.

Укажем недостатки варианта реконструкции с использованием ПВТ:

- необходимость установки двухсветных экранов в камере охлаждения;
- усложнённые условия работы опускных ширм и двухсветных экранов при их размещении в камере горения;
- недостаточная тепловая эффективность поверхностей нагрева верхнего, со стороны фронта, угла камеры охлаждения;
- наличие возвратных течений на заднем экране при нерасчётных режимах работы ПВТ, что приводит к зашлаковыванию в этих локальных местах.

Выполнен предпроектный позонный тепловой расчет топочной камеры котла ТП-87 в исходном и реконструированном под вихревую камеру горения вариантах. Часть результатов этого расчета приведена на рис. 6. Топливом для котла является: промпродукт обогатительных фабрик Пр Пр, кузнецкий Т и СС2. Температура на выходе газов из топки с ВТ 1150 °С близка к регламентному значению, а на нижнем срезе ширм она достигает 1225 °С. Оптимальной тониной помола угольной пыли для котла с ВК считается: для Пр Пр и СС2  $R_{90}=12...15$  %, для марки Т –  $R_{90}=5...6$  %.

Ожидаемый уровень  $\text{NO}_x$  реконструированного ТП-87 под ВТ на номинальной нагрузке составит менее 0,5 г/м<sup>3</sup> ( $\alpha_T=1,4$ ) по сравнению с 1,1 г/м<sup>3</sup> в существующем котле.

Коэффициент тепловой эффективности экранов в топке составляет ~0,3, а двухсветных ~0,35.

Таким образом, по варианту реконструкции котла ТП-87 на ВТ имеется развитая научная база, положительный опыт освоения ВТ на ряде угольных парогенераторов, а также возможность «вписаться» в имеющиеся габариты котла ТП-87 с использованием уже существующей системы ЖШУ и пылеприготовления с обеспечением экологических, технико-экономических и других показателей



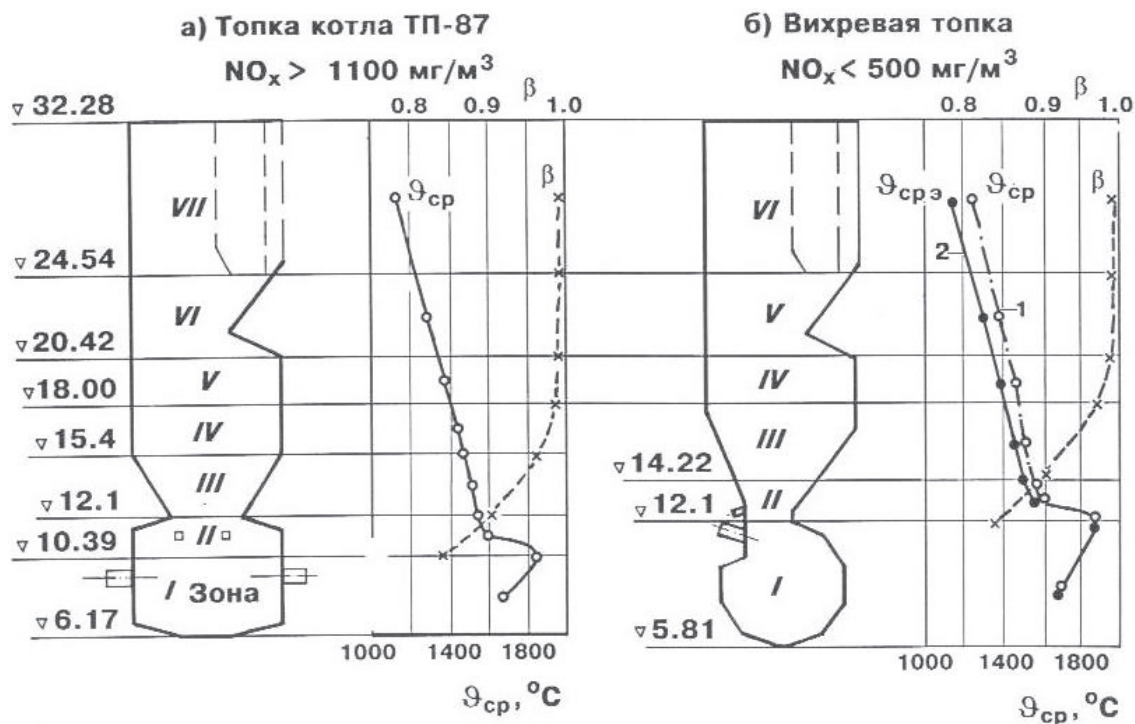


Рис. 6. Распределение температуры газов  $\Theta_{\text{ср}}$  и степени выгорания пылеугольных частиц  $\beta$  по высоте топки котла ТП-87: а) существующий вариант; б) вариант реконструкции под вихревую топку; 1 – топка без двухсветных экранов; 2 – топка с двухсветными экранами

### Заключение

1. Подведен некоторый итог выполненным к настоящему времени исследованиям и разработкам автора совместно с коллегами из ИТ СО РАН, ИВТ СО РАН, а также с сотрудниками НПО ЦКТИ, ТПУ и специалистами НТЭЦ-3, НКТЭЦ, аспирантами и магистрантами по сжиганию низкосортных топлив в парогенераторах вихревого типа.
2. Выполнен комплекс экспериментальных и компьютерных исследований рабочих процессов в парогенераторе с вихревой топкой Н.В. Голованова, на базе которого обоснованы и оптимизированы его конструктивно-компоновочные и режимно-экологические параме-

тры, удовлетворяющие современным требованиям энергетики.

3. К настоящему времени создана развитая научная база для реконструкции функционирующих парогенераторов под вихревую технологию сжигания низкосортных канско-ачинских и кузнецких углей. Рассмотрены проекты реконструкции парогенераторов БКЗ-320 и ТП-87 с применением вихревой топки.
4. Парогенератор с вихревой технологией сжигания с улучшенными экологическими, весогабаритными, маневренными, технико-экономическими и другими характеристиками успешно вписывается в состав экологически чистой ТЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованов Н.В. Малогабаритные парогенераторы с вихревой топкой ЦКТИ. Особенности конструкции и эксплуатации. Перспективы применения // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 1978. – Вып. 154. – С. 3–13.
2. Голованов Н.В., Митор В.В. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 1975. – Вып. 132. – С. 3–14.
3. Ицковский М.А. Создание и освоение опытно-промышленных и серийных котлов с вихревыми топками // Труды ЦКТИ. – Л.: ЦКТИ, 2002. – Вып. 159. – С. 127–138.
4. Заворин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997. – 187 с.
5. Билджер Р.В. Турбулентные течения предварительно перемешанных реагентов // Турбулентные течения реагирующих

газов / под ред. П.А. Либби, Ф.А. Вильямса. – М.: Мир, 1983. – 328 с.

6. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 853 с.
7. Keuno A.V., Salomatov V.V. Not-wire measurements in three-dimensional turbulent flows with the probe rotated in one plane // Thermophysics and Aeromechanics. – 1997. – V. 4. – № 1. – P. 17–24.
8. Пахомов Л.М., Саломатов В.В. Тепловизионный метод визуализации течений в моделях экологически чистых парогенераторов // Оптика в экологии: Тезисы докладов Междунар. конф. – СПб., 1997. – С. 71–73.
9. Красинский Д.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Математическое моделирование трехмерного турбулентного течения в вихревой топке парогенератора // Вычислительные технологии. – 1995. – Т. 4. – № 12. – С. 189–198.



10. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // *AIChE J.* – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–311.
11. Haynes B.S. The oxidation of hydrogen cyanide in fuel-rich flames // *Combustion and Flames.* – 1977. – V. 28. – № 2. – P. 113–121.
12. Experimental modelling and numerical simulation of Vortex Furnace Aerodynamics Processes / A.V. Keyno, D.V. Krasinsky, A.D. Rychkov, V.V. Salomatov // *R.J. Engineering Thermophysics.* – 1995. – V. 5. – № 4. – P. 12–30.
13. Красинский Д.В., Саломатов В.В. Численное моделирование процессов факельного сжигания пылеугольного топлива и образования  $\text{NO}_x$  в вихревой топке // *Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность.* – Новосибирск: НГТУ, 2000. – Вып. 4. – С. 24–36.

Поступила 20.02.2014 г.

UDC 621.311

## SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF DEVELOPMENT AND LOW-COST RECONSTRUCTION OF COAL STEAM GENERATORS FOR VORTEX COMBUSTION TECHNOLOGY

Vladimir V. Salomatov,

Dr. Sc., Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev avenue, 1. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

The author has summed up the results of experimental and numerical simulation of vortex combustion processes and emission of toxic discharge at combustion of low-grade coal, in particular, in the steam generator with a vortex furnace of N.V. Golovanov from scientific-production association CKTI, with which IT SB RAS has long scientific cooperation. The study of turbulent aerodynamics of the vortex furnaces with the use of physical and mathematical models made it possible to determine their main dimension and assembling relations, and simulation of radiant heat transfer, fuel combustion, and chemical kinetics of toxic emission formation was the basic information for determining their energy and ecological parameters. A set of modern level research work resulted in recommendations for further improvement of design and operation characteristics of the steam generator with a vortex furnace on Berezovsk coals of Kansk-Achinsk deposit, and formed the basis for the projects of TP-87 boiler reconstruction at Novokuznetsk TPP on Kuznetsk coals and BKZ-320 (Barnaul Boiler Plant) and Novosibirsk TPP-3 on Berezovsk coals.

### Key words:

Power engineering, coal steam generator, ecology, reconstruction, vortex furnace, turbulent aerodynamics, heat and mass transfer, heat radiation, toxic emissions.

### REFERENCES

1. Golovanov N.V. Malogabaritnye parogeneratory s vikhreвой topkoy TsKTI Osobennosti konstruksii i ekspluatatsii. Perspektivy primeneniya [Compact steam generators with vortex furnace of CKTI. The features of construction and operation. Application prospects]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 1978, vol. 154, pp. 3–13.
2. Golovanov N.V., Mitor V.V. Osvoenie i issledovanie golovnykh malogabaritnykh parogeneratorov s vikhreвой topkoy TsKTI [Development and investigation of the head compact steam generators with vortex furnace of CKTI]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 1975, vol. 132, pp. 3–14.
3. Itskovsky M.A. Sozdanie i osvoenie opytно-promyshlennykh i seriyныkh kotlov s vikhrevymi topkami [Design and development of experimental-industrial and serial boilers with vortex furnaces]. *Proceedings of TsKTI.* Leningrad, 2002, vol. 159, pp. 127–138.
4. Zavorin A.S. *Sostav i termicheskie svoystva mineralnoy chaste burykh ugley* [Composition and thermal properties of the mineral part of brown coals]. Novosibirsk, IT SB RAS, 1997. 187 p.
5. Bilger R.W. Turbulentnye techeniya predvaritelno nepere-meshannykh reagentov [Turbulent Flows with Nonpremixed Reactants]. *Turbulentnye techeniya reagiruyushchikh gazov* [Turbulent Reacting Flows]. Ed. by P.A. Libby, F.A. Williams. Moscow, Mir, 1983. 328 p.
6. Salomatov V.V. *Prirodookhrannye tekhnologii na teplovyykh i atomnykh elektrostaniyakh* [Environmental technologies for thermal and nuclear power plants]. Novosibirsk, NSTU, 2006. 853 p.
7. Keyno A.V., Salomatov V.V. Not-wire measurements in three-dimensional turbulent flows with the probe rotated in one plane. *Thermophysics and Aeromechanics*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 17–24.
8. Pakhomov L.M., Salomatov V.V. Teplovizionnyy metod vizualizatsii techeny v modelyakh ekologicheski chistykh parogeneratorov [The method of thermal visualization in models of environmentally clean steam generators]. *Optika v ekologii. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. International Conference. Optics in Ecology]. St. Petersburg, 1997, pp. 71–73.
9. Krasinsky D.V., Rychkov A.D., Salomatov V.V. Matematicheskoe modelirovanie trekhmernogo turbulentnogo techeniya [Mathematical simulation of 3D turbulent flow in a vortex furnace of steam generator]. *Vychislitel'naya tekhnologiya – Computational Technologies*, 1995, vol. 4, no. 12, pp. 189–198.
10. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion. *AIChE J.* 1982, vol. 28, no 2, pp. 302–311.
11. Haynes B.S. The oxidation of hydrogen cyanide in fuel-rich flames. *Combustion and Flames*, 1977, vol. 28, no. 2, pp. 113–121.
12. Keyno A.V., Krasinsky D.V., Rychkov A.D., Salomatov V.V. Experimental modelling and numerical simulation of Vortex Furnace Aerodynamics Processes. *R.J. Engineering Thermophysics*, 1995, vol. 5, no. 4, pp. 12–30.
13. Krasinsky D.V., Salomatov V.V. Chislennoe modelirovanie protsessov fakelnogo szhiganiya pyლეугольного топлива i obrazovaniya  $\text{NO}_x$  v vikhreвой topke [Numerical simulation of the processes of flame combustion of coal-dust fuel and  $\text{NO}_x$  formation in a vortex furnace]. *Teploenergetika. Fiziko-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy, novye tekhnologii, tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost* [Thermal Engineering. Physical-Technical and Ecological Problems, New Technologies and Technical-Economical Efficiency]. Novosibirsk, NSTU, 2000, vol. 4, pp. 24–36.

## РОТОРНО-ВИНТОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

**Евгений Михайлович Пузырёв,**

д-р техн. наук, профессор, зам. директора по научной работе  
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», Россия, 656015, г. Барнаул,  
проезд Южный, 17а. E-mail: pem-energo@list.ru

**Вадим Алексеевич Голубев,**

старший инженер ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», Россия, 656015,  
г. Барнаул, проезд Южный, 17а. E-mail: wadon@yandex.ru

**Михаил Евгеньевич Пузырёв,**

старший инженер ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», Россия, 656015,  
г. Барнаул, проезд Южный, 17а. E-mail: pem.proekt@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития установок распределённого производства энергии, использующих местные виды топлива. Причем нужны дополнительные распределённые источники энергии не только в виде тепла, но и электроэнергии. Это важно, например, для отдалённых и северных территорий России, не имеющих централизованного снабжения энергией, а также для объектов нового строительства. Кроме того, распределённая когенерация обеспечивает более эффективное использование энергии сжигания топлива и минимизирует потери передачи энергии.

**Цель работы** заключается в рассмотрении существующих схем и разработок силовых устройств, используемых для производства электроэнергии. На этой основе выделены новые подходы к созданию двигателей, пригодных для систем дополнительных распределённых источников энергии.

**Метод исследования** заключается в термодинамическом рассмотрении вариантов силовых циклов. При этом важны конструктивные особенности и кинематические принципы построения двигателя. Степень сжатия, как конструктивная характеристика, здесь имеет определяющее значение. Важную роль играет принцип уравнивания действующих сил в двигателе.

**Результаты:** Предложен новый класс силовых машин, пригодных для установок распределённого производства энергии, – роторно-винтовых двигателей.

**Выводы:** Роторно-винтовые двигатели могут использоваться для работы в качестве расширительных машин в цикле Ренкина. Они могут также использоваться в циклах двигателей внутреннего и внешнего сгорания. Эти двигатели имеют высокую степень сжатия. Радиальные и осевые силы, действующие в двигателях, работающих по предложенным схемам, взаимно уравниваются.

**Ключевые слова:**

Распределённое производство энергии, пар, паровой двигатель, турбина, компрессор, когенерация, цикл Ренкина.

В настоящее время в России, особенно при строительстве новых объектов, широко используется индивидуальное теплоснабжение. Индивидуальные котельные, например котельные крышного типа, производящие исключительно тепловую энергию для нужд населенного пункта, предприятия, квартала, даже в городах с развитыми тепловыми сетями оказались гораздо выгоднее и комфортнее, чем услуги центрального теплоснабжения от городских ТЭЦ.

Промышленно развитые страны сейчас вводят заметную часть электроэнергии с её выработкой не централизованно на больших электростанциях, а с использованием распределённого производства энергии. Концепция распределённых энергетических ресурсов подразумевает наличие множества потребителей, которые производят тепловую и электрическую энергию для собственных нужд, направляя их излишки в общую сеть. Такой подход ведет к уменьшению числа и протяженности линий электропередач и теплотрасс, которые необходимо построить, снижению потерь энергии при транспортировке из-за максимального приближения к потребителям вплоть до расположения их в одном здании.

Типичное распределённое производство электроэнергии характеризуется низкими затратами на обслуживание, слабым загрязнением окружающей среды и высокой эффективностью. В прошлом для этого требовались опытные операторы, но в настоящее время благодаря автоматизации, использованию чистых источников энергии, таких как природный газ, размер экономически эффективных энергоустановок уменьшился. Особенно эффективны когенерационные установки малой и средней мощности, позволяющие полезно использовать до 80 % энергии от теплоты сгорания топлива. Так, установки на базе микротурбин Капстоун производят электроэнергию ценой в 2,0–2,5 рубля за кВт·ч и дополнительно выдают бесплатные 1,5 кВт·ч тепла. Электрический КПД микротурбин достигает 32 %, а расход природного газа составляет 0,30–0,65 куб. м на один произведенный кВт·ч электричества.

Применение подобных установок приводит к значительной экономии топлива и финансов на производство энергии в США, по оценкам специалистов фирмы Капстоун, до 40 % [1]. Помимо микротурбин фирмами США, Италии, Германии и других стран предлагается большое количество жидкото-

плавных и газовых когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1].

В России огромные размеры страны при низкой плотности населения делают экономически невыгодной транспортировку электроэнергии конечным потребителям. Внедрение систем с распределенной генерацией в скором будущем станет просто необходимым. Рост экономики и, следовательно, рост числа потребителей электрической энергии делают принципиально невозможным удовлетворение энергетических нужд исключительно за счет централизованных источников.

Постоянно возрастающая стоимость топлива и электроэнергии, ужесточение экологических требований и повышение штрафных санкций к электрогенерирующим компаниям делают широкое внедрение энергосистем с распределенной генерацией еще более привлекательным.

Учитывая вышеизложенные аргументы, потенциал распределенной энергетики в Российской Федерации оценивается как очень высокий. Предполагается, что в ближайшие 10 лет объекты распределенной генерации обеспечат суммарную мощность в пределах 20–40 тысяч МВт. Прогнозируется [2], что в значительной мере распределенная энергетика будет паровой, так как в России имеется огромное количество местных котельных с теплотрассами, электрическими сетями и другой дорогостоящей инфраструктурой. При этом вне зависимости от наличия современных разработок [1] предлагается использовать [3, 4] в двигателях паропоршневые технологии.

В Алтайском государственном техническом университете значительное внимание уделяется разработке различных новых типов двигателей [5, 6], в том числе паровых, которые представляют значительный интерес для промышленной энергетики в связи с постоянным удорожанием энергии, прежде всего электрической.

По принципу действия паровые двигатели менее сложны, чем ДВС, это более простые расширительные машины или, по сути, – это обращенные компрессоры, которые не менее чем ДВС распространены, но более разнообразны по принципу действия.

Ранее «в век пара» паровые двигатели также имели большое разнообразие и применялись на паровозах, пароходах, паровых автомобилях и в проектах даже на самолетах. Однако на сегодня наиболее распространены в электро- и силовой энергетике паровые турбины, используемые преимущественно для привода турбогенераторов электростанций и, иногда, силовых приводов насосов и тягодутьевых машин, работающих на ТЭЦ [2, 7]. Паровые турбины, вытеснив другие типы двигателей, с другой стороны, оказались практически невозможными, прежде всего из-за дороговизны и низкой маневренности в малой и локальной энергетике, где типично применяются дизельные электростанции (ДЭС) и поршневые мини-ТЭЦ на природном газе.

Паропоршневые двигатели на сегодня продолжают производиться в ограниченных количествах, например, немецкой фирмой Spilling или, как предложено [2–4], используются путем переделки современных типовых поршневых ДВС. При этом их показатели термодинамической эффективности не ниже, чем у паровых турбин с противодавлением [2]. Однако, в отличие от западных стран и даже, например, Украины, в России практическое применение распределенной энергетики во многом сдерживается законодательным закреплением монополизма больших генерирующих компаний.

В качестве недостатков поршневых машин следует отметить, *во-первых*, удары и неуравновешенность действующих сил, наличие мертвых точек и необходимость применения смазочных материалов, которые попадают в рабочее тело – воду, создавая проблемы в котле. *Во-вторых*, собственно рабочий объем занимает незначительную долю в ДВС, 15...25 %, в отличие от турбин.

Рассматривая историческое развитие двигателя и компрессоростроения применительно к вопросу о паровых машинах при выборе аналогов, следует отдать предпочтение последнему, как более успешному. Так, на сегодня наиболее распространенными являются не поршневые, а винтовые компрессоры. Согласно [8] возможно их применение и в качестве паровой расширительной машины. Практика внедрения, однако, показала здесь наличие типичных недостатков двухвинтовых роторных машин [9]:

- низкая производительность или мощность единичной установки из-за участия в работе только одного из шести каналов;
- сложность конструкции, в том числе из-за требования высокой точности изготовления плотно установленных, взаимно контактирующих, вращающихся элементов и системы компенсации осевых усилий;
- низкая надежность из-за больших некомпенсированных осевых и радиальных усилий роторов.

Из последних, наиболее эффективных, выделим одновинтовой компрессор [10], конструкция которого, благодаря простоте, надежности и другим преимуществам, получает всё большее распространение [11, 12]. Этот тип компрессоров производится компаниями DAIKIN, VILTER и другими. Одновинтовой компрессор, как любой другой оппозитный агрегат, отличается полной уравновешенностью радиальных нагрузок, что положительно влияет на долгосрочную службу подшипников, а также компактностью, низким уровнем шума и простотой в эксплуатации.

Именно рассматриваемый механизм (рис. 1) с соответствующими усовершенствованиями [13] предлагается использовать в качестве роторно-винтового двигателя – расширительной машины для цикла Ренкина, а также в двигателях внешнего и внутреннего сгорания, в паровых и пневматических приводах и компрессорах.

При рассмотрении паросилового цикла Ренкина с использованием роторно-винтового двигателя [13] учитываются известные термодинамические оценки и исследования эффективности цикла [7, 14], в том числе приведенные на рис. 2.

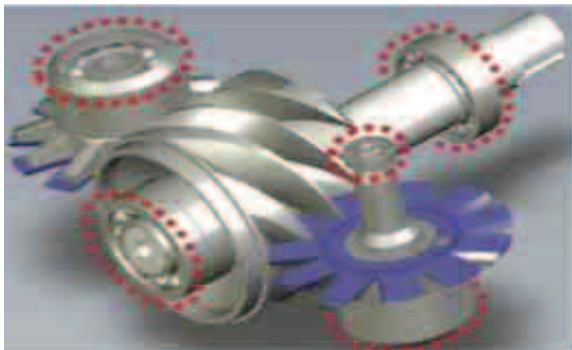


Рис. 1. Ротор одновинтового компрессора с глобоидальным профилем и заслонками

Как и в паровой турбине, здесь в условиях, близких к адиабатическим ( $S=\text{const}$ , постоянная энтропия), срабатывает энергия рабочего тела (пара), равная разнице энтальпий  $H_0=i_0-i_k$  кДж/кг в начальном  $i_0$  и конечном  $i_k$  состояниях. На рис. 2 показано, что рост начальных параметров пара  $P_0$  и  $T_0$  за счет его перегрева, подъем  $T_0$ , позволяет значительно увеличить «заряд» энергии пара  $H_0$  в сравнении с состоянием насыщения.

Повышение давления  $P_0$  воздействует на  $H_0$  неоднозначно, кривые имеют максимум (рис. 2, а). При этом максимум  $H_0$  по мере роста начального давления  $P_0$  смещается в сторону большего давления.

С другой стороны, более важной характеристикой является не «заряд» энергии, а  $H_0$  эффективность превращения этой энергии пара, т. е. доля располагаемой энергии, переходящая в полезную работу –  $\eta$ , термодинамический КПД цикла (рис. 2, б). И здесь видно, что рост начальных параметров пара  $P_0$  и  $T_0$  однозначно увеличивает, поэтому в энергетике эти приемы используются одновременно, их потолок ограничивается только прочностью и стойкостью труб пароперегревателя котла.

Рассматриваемые роторно-винтовые двигатели хотя и имеют вращающийся ротор, по принципу действия (рис. 1) они ближе к поршневым машинам, чем к применяемым в электроэнергетике паровым турбинам, потому что здесь, подобно поршневым машинам, важную роль играет удержание пара в расширяющемся рабочем объеме за счет уплотнения зазоров между ротором, корпусом и заслонками. И наличие влаги в паре, в отличие от паровых турбин, здесь сказывается благоприятно, вода уплотняет зазоры и одновременно является смазкой.

Эту особенность работы предлагаемой конструкции нужно учитывать при выборе параметров и оценке термического КПД цикла. Первонач-

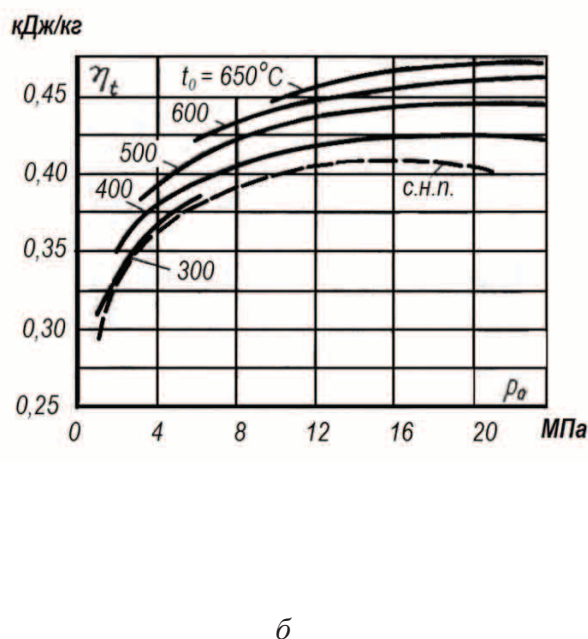
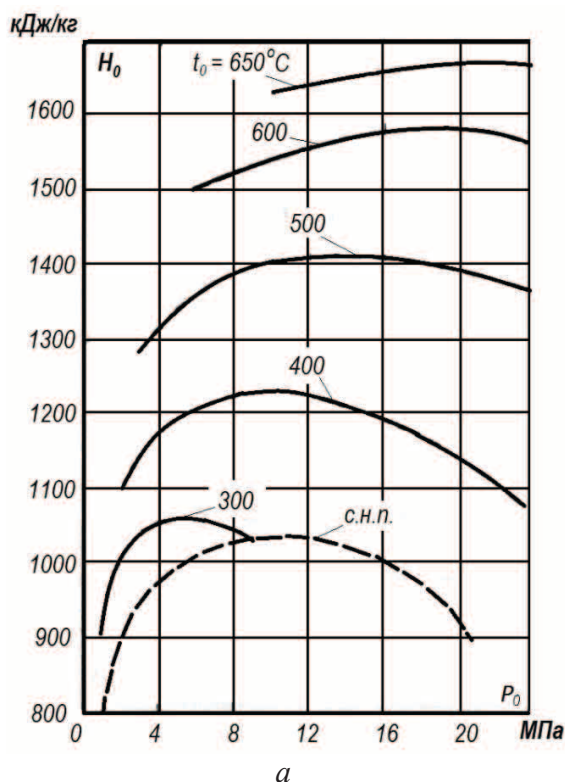


Рис. 2. Влияние начальных параметров пара на: а) располагаемый теплоперепад  $H_0$ ; б) КПД идеального цикла парового двигателя [14]: с.н.п. – сухой насыщенный пар,  $P_c=4$  кПа



чально мы рассматриваем использование предлагаемой разработки для промышленной энергетики, где параметры пара, давление и температура типично ограничены категорией  $P_0=4$  МПа,  $T_0=440$  °С и широким применением насыщенного пара с давлением до 4,0 МПа.

При этом ( $P_0=4$  МПа,  $T_0=440$  °С) как следует из рис. 2, б, термодинамический КПД цикла  $\eta_i$  весьма значительный, до  $\eta_i=38$  % в сравнении с предельным для электроэнергетики –  $\eta_{i\max}=47,5$  %. Переход к использованию насыщенного пара  $P_0=4$  МПа,  $T_0=250$  °С хотя и заметно уменьшает  $H_0$ , с 1240 до 980 кДж/кг (рис. 2, а), но несущественно снижает термодинамический КПД, всего на 1,5 %, до  $\eta_i=36,5$  %. Характерно, что при переходе к насыщенному пару его удельный объем снижается в 1,577 раз, и соответственно увеличивается мощность при неизменной проточной части двигателя.

Таким образом, на основе сравнительного и термодинамического анализа предлагается применять роторно-винтовые расширительные машины, которые на насыщенном или слабо перегретом паре будут достаточно эффективны при их простом устройстве, ценовой доступности и могут получить широкое распространение.

Паровые двигатели предполагается выполнять стационарными с приводимой мощностью в десятки и сотни киловатт. Эти двигатели могут использоваться и для когенерации. Срабатывание пара до температуры  $T_k=95-115$  °С, характерной для неподнадзорной теплоэнергетики, позволит полностью использовать выхлоп паровой машины для несения отопительной нагрузки и повысить полный КПД использования топлива на мини-ТЭЦ до 80...85 %.

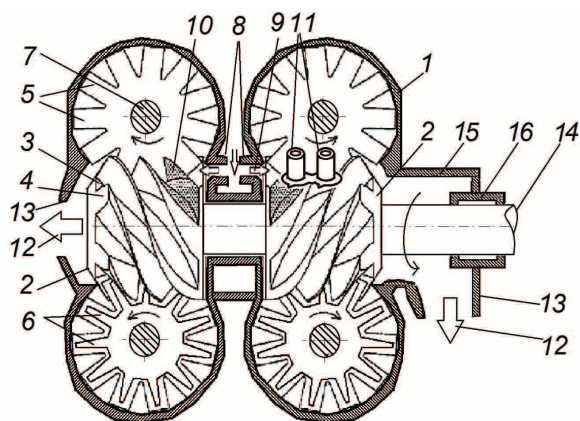


Рис. 3. Вариант расширительной роторно-винтовой машины

Профилирование проточной части должно обеспечить, как и в паро-поршневых машинах, минимальные протечки пара и потери энергии, которые на данной стадии разработки трудно оценить. Усовершенствование прототипа [9] также направлено на увеличение пропускной способности и степени сжатия: установка на валу попарно двух и более ступеней, профилирование рабочих каналов,

увеличение числа заслонок (замыкателей), применение промежуточного отбора пара и другое. Например, выполнение роторно-винтового двигателя из установленных на валу попарно ступеней позволяет при прочих равных условиях увеличить в два, четыре и более раз мощность, а последовательная установка пар ступеней – увеличить степень расширения. Один из вариантов схемы предлагаемой паровой роторно-винтовой машины показан на рис. 3.

Роторная машина в варианте расширительной машины (рис. 3) включает пару рабочих ступеней, правую и левую, установленных встречно (зеркально) с расположением зоны высокого давления в середине между ними, и этим обеспечивается взаимная компенсация осевых усилий и увеличение в два раза мощности установки. Каждая ступень содержит установленный в корпусе – 1 ротор – 2, имеющий винтовые многозаходные рабочие каналы – 3, образованные винтовыми перегородками – 4. Причем направления навивок перегородок – 4 в этих зеркально установленных ступенях выполняются противоположными. Каналы – 3 плотно перекрыты корпусом – 1 и заслонками – 5, закрепленными на звездочках – 6 с валами – 7 зеркально симметрично по отношению к ротору – 2.

Перед каждой заслонкой – 5 в зоне её входа в рабочий канал – 3 в корпусе – 1 с обеих сторон от роторов – 2 установлены патрубки – 8 сжатого рабочего тела, служащие для его подвода (показано стрелкой – 9). Штриховкой показан текущий объем – 10 канала – 3 в процессе расширения рабочего тела. В корпусе – 1 так же симметрично установлены патрубки – 11 промежуточного отбора рабочего тела, а стрелкой – 12 показан его выхлоп в патрубки – 13. Роторы – 2 закреплены на валу – 14. Вал служит для отбора мощности и выводится из расширительной машины – 15 через уплотнение – 16 простейшего типа, возможно с двух сторон. И так как давление в выхлопе близко к атмосферному, конструкция торцевых уплотнений и машины в целом упрощается.

Естественно, что роторная машина (рис. 4) может быть компрессором: вал – 14 подключается к двигателю со сменой направления вращения вала – 14 и заслонок – 5, патрубки – 13 соединены с атмосферой, а патрубки – 8 сжатого воздуха к ресиверу.

Предлагаемая роторно-винтовая машина может применяться в силовых циклах. В цикле, подобном газовой турбине (рис. 4), с подключением ступени сжатия к ступени расширения через камеру сгорания, или в циклах ДВС с установкой в корпусе ступеней расширения за подводящими патрубками в зонах высокого давления пар свечей и/или топливных форсунок. Применима она и в замкнутых циклах двигателей внешнего сгорания и других с контуром циркуляции рабочего тела. Здесь также используются пары рабочих ступеней, но направления навивок рабочих каналов – 3 пар ступеней одинаковые. В роторной машине цикла типа газовой



турбины (рис. 4) справа расположена ступень компрессора – 22 с ротором – 2, заслонками – 5, патрубками высокого давления – 8 и всасывающим – 23, а слева ступень расширения – 24 с патрубками высокого давления – 8 и выхлопным – 25. Роторы – 2 ступеней закреплены на валу – 14 с расположением зоны высокого давления между ними, и этим компенсируются осевые усилия. Вал – 14 установлен в подшипнике – 26 на его выходе, так как он установлен на всесе, используется подшипник – 27, причем без уплотнения, что упрощает конструкцию машины. Выхлопной патрубок – 25 ступени расширения – 24 выхлопным газоходом – 28 подключен к регенеративному теплообменнику – 29 и далее к атмосфере, а патрубок высокого давления – 8 компрессора – 22 трактом – 30 подключен последовательно к теплообменнику – 29, камере сгорания – 31 и к паровку высокого давления – 8 ступени расширения – 24.

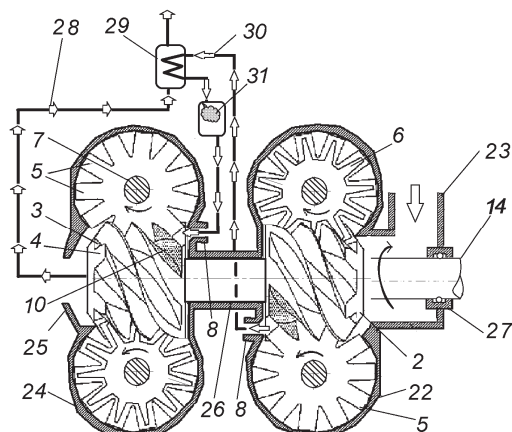


Рис. 4. Вариант применения роторно-винтовой машины в цикле типа газовой турбины

Отметим, что роторная машина для цикла ДВС в варианте без регенерации тепла выхлопа выполняется ещё проще, прямым соединением патрубками высокого давления – 8 ступеней – 22 и 24 с установкой в её корпусе за подводящими патрубками пары свечей и/или топливных форсунок.

Пара ступеней сжатия – 22 и расширения – 24, установленных на общем валу – 14, могут использоваться в замкнутых циклах типа силового цикла двигателя внешнего сгорания (ДВС) и других циклов по схеме на рис. 6. В контур циркуляции рабочего тела входят: ступень сжатия – 22, регенераторы – 32, 33 теплоты выхлопа и промежуточных отборов ступени расширения – 24 с патрубками отбора – 11 и горячий теплообменник – 34, соединенные в общий контур циркуляции трубопроводами – 35. Тепло в горячий теплообменник – 34 подается от подогревателя – 36 по контуру циркуляции – 37.

На рис. 5 показан двухступенчатый паровой двигатель для цикла Ренкина с перегревом пара, используемого на конденсационной ТЭЦ [7, 14]. Здесь пар расширяется в сотни и тысячи раз от давления в сотни атмосфер до глубокого вакуума. Та-

кое срабатывание давления может быть обеспечено последовательным включением всего лишь двух, трех ступеней расширения. Расширительная машина имеет два последовательно включенных блока высокого – 38 и низкого давления – 39, установленных последовательно и подключенных паропроводами – 40 к котлу – 41.

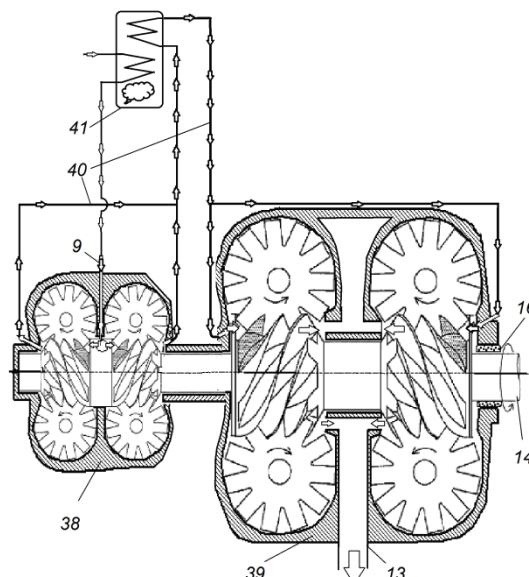


Рис. 5. Вариант применения двухступенчатого двигателя в цикле Ренкина

Перегретый пар высокого давления из котла – 41 по паропроводу – 40 поступает, как показано стрелкой – 9, в блок – 38 высокого давления и здесь расширяется. Далее пар по паропроводам – 40 возвращается в котел – 41, повторно перегревается и по паропроводам – 40 подается в блок – 39 низкого давления. В блоке – 39 низкого давления пар расширяется до глубокого вакуума и по патрубку – 13 низкого давления сбрасывается в паровой конденсатор. После конденсации вода возвращается в котел – 41, испаряется, и цикл повторяется. При работе машины расширения так, как было описано выше, осевые усилия ступеней в блоках взаимно компенсируются. В роторной машине имеется одно уплотнение – 16 вала – 14, по схеме подключения оно установлено в зоне промежуточного давления, и это упрощает его конструкцию.

Рассмотрим вариант реализации двухступенчатой расширительной машины.

Пример 1. Расширительная машина (рис. 5) с последовательным включением двух блоков ступеней со степенью снижения давления в каждом блоке  $n=25$  имеет  $(P_1/P_2=n^2=625)$  соответственно уменьшение давления в 625 раз. Расширение пара в паровых конденсационных турбинах малой мощности типично осуществляют до давления  $P_2=8 \text{ кПа}=0,008 \text{ МПа}$ , и соответственно начальное давление пара для такой степени расширения составит  $P_1=5 \text{ МПа}$ , типичное для турбин малой мощности. Для более мощных паровых турбин расширение осуществляют от большего давления, напри-

мер,  $P_1=25,5$  МПа до давления  $P_2=0,004$  МПа с отношением давлений  $P_1/P_2=6375$ . Здесь потребуются два блока со степенью снижения давления  $n_2=(6375)^{0,3}\approx 80$ , что нереально, или три блока с меньшей степенью сжатия  $n_3=(6375)^{0,333}\approx 19$ .

Касаясь соотношения геометрических размеров ступеней, оценим, что, например, при степени снижения давления в каждой из двух ступеней  $n=25$  будет соответствующее увеличение удельных объемов рабочего тела и проточной части примерно в 25 раз. Характерный линейный размер проточной части второй ступени, например, диаметр ротора соответственно увеличится, как корень третьей степени из 25, то есть в 2,92 раза, примерно так, как приведено на рис. 5. Такое увеличение размеров второй ступени расширения вполне выполнимо и примерно соответствует соотношению размеров для типовых многоступенчатых паровых турбин.

Рассмотрим собственно работу роторно-винтовой машины – 15 расширительного типа (рис. 3). Её действие в различных вариантах применения одинаково. Сжатое рабочее тело, например пар, вводится через подводящие патрубки – 8, как условно показано стрелками – 9, в рабочие каналы – 3 перед заслонками – 5 одновременно в правой и левой ступенях. При дальнейшем повороте вала – 14 и роторов – 2 каналы – 3 перемещаются относительно корпуса – 1 и отключаются от патрубка – 8, а заслонки – 5 входят в каналы – 3 и выделяют в этих замкнутых объемах порцию пара. Пар давит на винтовые перегородки – 4 канала – 3 и заслонку – 5, расширяется в выделенном штриховкой объеме – 10 рабочего канала – 3, совершает перемещение и полезную работу. Кроме того, доля частично расширившегося пара при совмещении объема – 10 с отверстием патрубка – 11 промежуточного отбора может быть отведена для теплофикации и/или регенерации тепла, обеспечивая повышение экономичности цикла. Расширение пара заканчивается с открытием канала – 3 на выхлоп при выходе луча заслонки – 5 из зацепления, причем канал – 3 сразу снова начинает заполняться паром от второго патрубка – 8, и вторая заслонка – 5 выделяет следующую порцию пара. Отработавший пар поступает на выхлоп через отводящие патрубки – 13, как показано стрелками – 12. Этот процесс со сдвигом по фазе протекает и в других каналах – 3 и одновременно во второй, симметрично расположенной половине ротора – 2, с передачей работы пара и вращающего момента на вал – 14.

Отметим, что предлагаемая конструкция [13] работоспособна и в высокотемпературных циклах типа газовых турбин и ДВС. Благодаря попарной, встречной установке ступеней при работе компенсируются их осевые усилия. Размещение зоны высокого давления в центре, рис. 3, а зон с более низким давлением по краям, на выхлопе – 12 упрощает конструкцию уплотнения выходов вала – 14 из машины. Действительно, в центре, в зоне подвода высокого давления, уплотнение вала не требуется

благодаря симметричной подаче рабочего тела с обеих сторон в патрубок – 8, а уплотнение – 16, которое препятствует потере отработавшего рабочего тела по вращающемуся валу – 14 расширительной машины – 15, работает в условиях малого избыточного давления и низкой температуры.

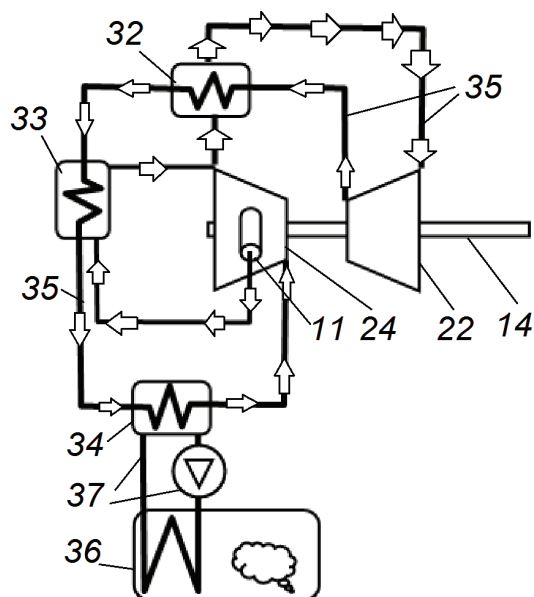


Рис. 6. Вариант применения роторной машины в цикле двигателя внешнего сгорания

Работа роторно-винтовой машины в силовых циклах, например, типа газовой турбины, рис. 4, с подключением ступеней через камеру сгорания – 31 не отличается от описанной выше. Воздух всасывается через патрубок – 23, сжимается в ступени компрессора – 22, далее нагнетается по тракту – 30 в ступень расширения – 24, причем движется по ступеням – 22, 24 в одном направлении на проход. Между ступенями к рабочему телу подводится тепло, причем в процессе, близком к изобарному. Сначала воздух подогревается в регенеративном теплообменнике – 29 теплом выхлопа и/или промежуточных отборов из патрубков – 11 средой, которая подается по газоходу – 28 из выхлопа – 25 и/или из патрубков отбора – 11 расширительной ступени, обеспечивая повышение экономичности цикла. Основное тепло в цикл вводится в камере сгорания – 31 путем сжигания топлива в потоке воздуха, затем продукты сгорания расширяются в ступени – 24 с передачей полученной мощности через вал – 14 на привод компрессора – 22 и электрогенератора.

При работе пары ступеней сжатия – 22 и расширения – 24 (рис. 6), установленных на общем валу – 14 в замкнутых циклах типа газовой холодильной машины, а также силового цикла двигателя внешнего сгорания и других циклов, принцип действия тот же. Рабочее тело входит в ступень сжатия – 22 по трубопроводу – 35, в нем сжимается и поступает в регенераторы – 32, 33. В них рабочее тело подогревается за счет теплоты выхлопа

па и промежуточных отборов, поступающих из патрубков – 11 ступени расширения 24, обеспечивая повышение КПД цикла. Основное тепло подводится в горячем теплообменнике – 34 от внешнего источника, подогревателя – 36 с контуром циркуляции – 37. Затем горячее рабочее тело по трубопроводу – 35 поступает для совершения полезной работы в ступень расширения – 24. Далее рабочее тело после выхлопа из расширительной машины – 24 охлаждается в регенераторе – 32, отдавая тепло, и снова поступает в компрессор – 22, и цикл повторяется. Работа ступеней – 22 и 24, как было описано выше, обеспечивает взаимную компенсацию осевых усилий.

Пример 2. Двигатель с циклом типа газовой турбины (рис. 4) для привода электрогенератора с частотой вращения 50 Гц. Ротор – 2 выполнен с шестью каналами и двумя заслонками, соответственно, за один оборот в работе 12 каналов, и работа каналов осуществляется с частотой 600 Гц. Благодаря уравниваемости радиальных и осевых сил обеспечивается плавный ход и низкий уровень звука. Степень повышения давления не менее, чем в прототипе, свыше 25,  $P=25$  МПа.

Компания «ПроЭнергоМаш» проектирует и производит котлы [15], в том числе безбаранные с различными параметрами пара, газогенераторы [12]. Реконструирует паровые, в том числе энергетические котлы типа БКЗ-75 с параметрами перегретого пара 4 МПа/440 °С, достаточно эффективными для создания мини-ТЭЦ и паропроводных устройств. Оценочно удельный расход пара минимально может составить при термодинамическом КПД цикла  $\eta_t=38$  % и преобразовании механической энергии в электричество с эффективностью  $\eta_m=90$  % около 4,2 т пара/МВт и менее при использовании регенеративного подогрева питательной воды в цикле.

Котельные и ТЭЦ типично потребляют большое количество электроэнергии на привод циркуляционных насосов тепловых сетей, питательных насосов котлов и их тягодутьевых машин. Электроэнергетическое хозяйство многих ТЭЦ и котельных не защищено от аварийного останова, происходят даже аварии с полным обесточиванием городов и энергосистем при потере электроснабжения собственных нужд ТЭЦ. Поэтому возможность перевода основных потребителей на паровой привод, в том числе с установкой электрогенератора для собственных нужд, позволит не только заметно увеличить отпуск электроэнергии, но и повысит аварийную устойчивость котельных, ТЭЦ и энергосистем в целом.

Для решения проблем обеспечения паром собственных нужд водогрейных котельных «ПроЭнергоМаш» разработаны и производятся малогабаритные паровые котлы (рис. 7) безбаранной конструкции паропроизводительностью до 35–50 т/ч с рабочим давлением до 4 МПа. Эти малогабаритные котлы конструкции «ПроЭнергоМаш» благодаря

высокоэффективным вихревым топкам «Торнадо» могут использовать широкий круг топлива и отходов, имеющих повсеместно: уголь, торф, древесные отходы, лузгу и другие отходы сельскохозяйственного производства. Они позволяют также создать и транспортабельные установки модульного типа для производства электроэнергии.

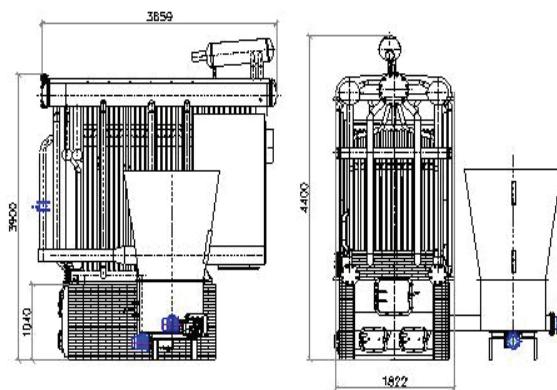


Рис. 7. Общий вид безбаранного котла E-4 с топочным устройством «Торнадо»

Перспективным направлением применения роторно-винтовых машин в варианте газовой турбины (рис. 4) на местных топливах также является использование для них в качестве источника энергии продуктов воздушной и паровоздушной газификации, получаемых в газогенераторах [16, 17]. Это в значительной мере практически исследованный путь, так как ранее, до промышленной добычи пригодного газа и отсутствия повсеместной газификации народного хозяйства, существовали [18] достаточно надежные устройства, в том числе транспортабельные. Разработки новых конструкций газификаторов сейчас возобновились [19], главным образом, в связи с расширением использования различных биотоплив и отходов.

#### Заключение

Применение разрабатываемых роторно-винтовых машин и новых разработок котельно-топочной техники позволит комплексно решать вопросы реконструкции и строительства угольных и утилизационных котельных и мини-ТЭЦ на основе новых технологий:

- организации эффективного и экологически более чистого сжигания топлива и огневой утилизации отходов;
- получения пара высоких параметров, в том числе в водогрейных и транспортабельных котельных;
- трансформации тепловой энергии пара в механическую для привода оборудования и электрогенераторов, производства электроэнергии на собственные нужды, и возможно для сторонних потребителей при появлении в России законодательства, развивающего распределенную энергетику.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компания «Новая Генерация». 2005–2013. URL: <http://www.manbw.ru/> (дата обращения: 18.03.2013).
2. Дубинин В.С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России // Промышленная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 7–12.
3. Применение паропоршневых технологий в котельных в качестве альтернативы внешнему электропитанию / В.С. Дубинин, К.М. Лаврухин, М.Ю. Алексеевич, С.О. Шкарупа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – № 6. – С. 17–20.
4. Дубинин В.С. Обеспечение независимости электро- и теплоснабжения России от электрических сетей на базе поршневых технологий. – М.: Изд-во МИЭЭ, 2009. – 164 с.
5. Токарев А.Н., Токарев М.Ю. Модернизированная конструкция роторного двигателя турбокомпрессорного типа // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3/4. – С. 163–170.
6. Доронин В.Т. Пять паровых тор-двигателей // Ползуновский Альманах. – 2009. – № 3. – С. 153–158.
7. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: Высшая школа, 1980. – 552 с.
8. Паровая винтовая машина: пат. Рос. Федерация № 2374455; заявл. 06.11.08; опубл. 27.11.09, Бюл. № 5.
9. Михайлов А.К., Ворошилов В.П. Компрессорные машины. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
10. Одновинтовой компрессор [Single screw compressor]: пат. США № US20130011291 A1; заявл. 02.03.11, опубл. 10.01.13.
11. Одновинтовой компрессор [Single screw compressor]: пат. США № US8348648 B2; заявл. 07.08.08, опубл. 08.01.13.
12. Одновинтовой компрессор [Single screw compressor]: пат. Евросоюза № EP2169229 A1; заявл. 12.05.08; опубл. 31.03.10.
13. Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. Роторные машины // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3/4. – С. 63–69.
14. Щегляев А.В. Паровые турбины. – М.: Энергия, 1976. – 368 с.
15. Применение вихревых топок «Торнадо» для перевода котлов на использование растительных и кородревесных отходов / Е.М. Пузырёв, К.С. Афанасьев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырев, Е.Б. Жуков // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: Сб. докл. V научно-практ. конф. – Челябинск, 2011. – Т. 1. – С. 236–248.
16. Разработка технологии пиролиза и применение газогенераторов при утилизации отходов / Е.М. Пузырёв, В.Г. Лурий, А.В. Лаптов, М.Е. Пузырёв // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 87–92.
17. Загруднинов Р.Ш., Негуторов В.Н., Малыхин Д.Г. и др. Подготовка и газификация твёрдых бытовых отходов в двухзонных газогенераторах прямого процесса, работающих в составе мини-ТЭЦ и комплексов по производству синтетических жидких топлив // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3/4. – С. 47–62.
18. Мезин И.С. Транспортные газогенераторы. – М.: Сельхозгиз, 1948. – 212 с.
19. Способ получения генераторного газа из растительного сырья: пат. Рос. Федерация № 2469073; заявл. 17.08.11; опубл. 07.12.12, Бюл. № 7.

Поступила 03.03.2014 г.

UDC 621.166.5

## ROTARY SCREW ENGINES

**Evgeniy M. Puzyrev,**

Dr. Sc., JSC Proenergomash-Proyekt, Russia, 656015, Barnaul, Yuzhny proezd, 17a. E-mail: pem-energo@list.ru

**Vadim A. Golubev,**

JSC Proenergomash-Proyekt, Russia, 656905, Barnaul, Yuzhny proezd, 17a. E-mail: wadon@yandex.ru

**Mikhail E. Puzyrev,**

JSC Proenergomash-Proyekt, Russia, 656905, Barnaul, Yuzhny proezd, 17a. E-mail: pem.proekt@mail.ru

*The relevance of the work is caused by the necessity to introduce the systems of distributed energy production using local types of fuel. More distributed energy sources as heat and electricity are also needed, it is important for remote and northern areas of Russia without centralized energy supply, as well as for new construction projects. Cogeneration provides more efficient use of fuel combustion energy and minimizes loss of energy transfer.*

**Objective:** to review existing schemes and development of power devices used for electricity production. The authors have determined new approaches to creating engines suitable for the systems of additional distributed energy sources.

**Research method:** thermodynamic consideration of the power cycle options. Design features and kinematic principles of the engine construction are very important in this case. Compression ratio as a constructive characterization is crucial. A principle of balancing power in the engine is also playing an important role.

**Results:** The authors proposed a rotary screw engines as a new class of power machines suitable for distributed energy generation.

**Conclusions:** Rotary screw motors can be used to operation as the expansion machines of the Rankine cycle and in cycles of internal and external combustion engines. The engines have a high compression rate. Radial and axial forces acting in the engines operating on the proposed schemas are mutually balanced.

**Key words:**

Distributed power generation, steam, steam engine, turbine, compressor, cogeneration, Rankine cycle.

## REFERENCES

1. Kompaniya «Novaya Generatsiya» [New Generation Company]. 2005–2013. Available at: <http://www.manbw.ru/> (accessed 18 March 2013).
2. Dubinin V.S. Sopostavleniye sistem tsentralizovannogo i detsentralizovannogo energosnabzheniya v sovremennykh usloviyakh Rossii [Comparison of centralized and decentralized energy supply in modern Russian conditions]. *Promyshlennaya energetika – Industrial Energy*, 2007, no. 1, pp. 7–12.
3. Dubinin V.S. Lavrukhin K.M., Alekseevich M.Yu., Shkarupa S.O. Primeneniye paroporshnevnykh tekhnologiy v kotelnykh v kachestve alternativny vnesnemu elektropitaniiyu [Application of steam-piston boiler technology as an alternative to an external electric power supply]. *Energobezopasnost i energosberezheniye – Energy security and conservation*, 2010, no. 6, pp. 17–20.
4. Dubinin V.S. Obespecheniye nezavisimosti elektro- i teplosnabzheniya Rossii ot elektricheskikh setey na baze porshnevnykh tekhnologiy [Ensuring the independence of electricity and heat supply from the Russian electrical networks based on reciprocating technologies]. Moscow, MIEE, 2009. 164 p.
5. Tokarev A.N., Tokarev M.Yu. Modernizirovannaya konstruktsiya rotornogo dvigatelya turbokompressorного типа [Streamlined design of rotary engine turbo type]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Herald*, 2013, no. 3/4, pp. 163–170.
6. Doronin V.T. Five torus steam engines [Pyat parovykh tor-dvigatelyey]. *Polzunovskiy Almanakh – Polzunovskiy Almanakh*, 2009, no. 3, pp. 153–158.
7. Alekseev G.N. *Obshchaya teplotekhnika* [General heating engineer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 552 p.
8. Berezin S.R., Feoktistov S.A. *Parovaya vintovaya mashina* [Steam screw machine]. Patent RF, no. 2374455, 2009.
9. Mikhaylov A.K., Voroshilov V.P. *Kompressornyye mashiny* [Compressor machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 288 p.
10. Hossain M.A., Ueno H., Masuda M. *Single screw compressor*. Patent US, no. US20130011291 A1, 2013.
11. Miyamura H., Okada T., Takahashi T., Ohtsuka K., Susa T., Ueno H., Murono T. *Single screw compressor*. Patent US, no. US8348648 B2, 2013.
12. Hossain M.A., Ohtsuka K., Masuda M. *Single screw compressor*. Patent EU, no. EP2169229 A1, 2010.
13. Puzyrev E.M., Golubev V.A., Puzyrev M.E. Rotornyye mashiny [Rotary machines]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Herald*, 2013, no. 3/4, pp. 63–69.
14. Shcheglyayev A.V. *Parovye turbiny* [Steam turbines]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 368 p.
15. Puzyrev E.M., Afanasyev K.S., Golubev V.A., Puzyrev M.E., Zhukov E.B. Primeneniye vikhrevykh topok «Tornado» dlya perevoda kotlov na ispolzovaniye rastitelnykh i korodrevesnykh otkhodov [Application of vortex furnaces «Tornado» to convert the boiler to plant and BWW use]. *Sbornik dokladov V Nauchno-prakticheskoy konferentsii. Mineralnaya chast topliva, shlakovanie, ochildka kotlov, ulavlivaniye i ispolzovanie zoly* [Proc. V Scientific and Practical Conference. Mineral part of the fuel slagging, cleaning boilers, capture and use of ashes]. Chelyabinsk, 2011, vol. 1, pp. 236–248.
16. Puzyrev E.M., Luriy V.G., Laptov A.V., Puzyrev M.E. Razrabotka tekhnologii piroliza i primeneniye gazogeneratorov pri utilizatsii otkhodov [Development of technology and application of pyrolysis gas generators at disposal]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovskiy Herald*, 2010, no. 1, pp. 87–92.
17. Zagrutdinov R.Sh., Negutorov V.N., Malykhin D.G. Podgotovka i gazifikatsiya tverdykh bytovykh otkhodov v dvukhzonnykh gazogeneratorakh pryamogo protsessa, robotayushchikh v sostave mini-TETs i kompleksov po proizvodstvu sinteticheskikh zhidkikh topliv [Preparation and gasification of solid household waste in two-zonal gas generators of direct process working as a part of mini-combined heat and power plant and complexes on production of synthetic liquid fuels]. *Polzunovskiy messenger*, 2013, no. 3/4, pp. 47–62.
18. Mezin I.S. *Transportnyye gazogeneratory* [Transport gas generators]. Moscow, Selkhozgiz Publ., 1948. 212 p.
19. Kostyunin V.V., Potapov V.N., Chuvaev S.I., Borozdin A.N., Gordeev I.V., Ovtsyn V.E. *Sposob polucheniya generatornogo gaza iz rastitelnogo syrya* [Method of obtaining generating gas from vegetative raw material]. Patent RF, no. 2469073, 2012.



УДК 662.642:621.18:621.311.22

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШИВЭ–ОВОО МОНГОЛИИ КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

**Заворин Александр Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой парогенераторостроения  
и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Долгих Александр Юрьевич,**

ст. преподаватель кафедры парогенераторостроения и парогенераторных  
установок Энергетического института ТПУ,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ShuraD@tpu.ru

**Саломатов Владимир Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, глав. науч. сотр. Института теплофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.  
E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Батмунх Сэрээтэр,**

д-р техн. наук, профессор, академик АН Монголии, директор Института  
теплотехники и промышленной экологии АНМ, заведующий кафедрой  
тепловых электрических станций Монгольского государственного  
университета науки и технологии, Монголия, 210646, г. Улан-Батор,  
район Сухэ-Батор, Бага Тойру, 34. E-mail: batmunkh\_acad@yahoo.com

**Энхжаргал Халтарын,**

д-р техн. наук, профессор, проректор Монгольского государственного  
университета науки и технологии, Монголия, 210646, г. Улан-Батор,  
район Сухэ-Батор, Бага Тойру, 34. E-mail: enkhjargal@must.edu.mn

*Ценовая нагрузка на потребителей энергетических услуг Дальневосточного федерального округа, которая существенно выше среднероссийской и определяется в значительной мере транспортной составляющей в стоимости привозного твердого топлива, актуализирует рассмотрение инженерно-технических вопросов замещения в топливно-энергетическом балансе региона источников снабжения энергоресурсами за счет угольных месторождений, более близких географически. Для принятия решения об использовании угля как энергетического топлива необходима исчерпывающая информация о комплексе его свойств, прежде всего о теплотехнических характеристиках. С этой целью выполнены исследования товарных партий угля месторождения Шивэ-Овоо в полном соответствии со стандартизированными российскими методиками. Сравнение с показателями качества освоенных и широко используемых в российской теплоэнергетике углей подтверждает в целом благоприятные для энергетического использования оценки теплотехнических свойств шивэ-овооского угля, который по совокупности полученных результатов исследований классифицируется как бурый, среднесернистый, с невысокой зольностью и большим выходом летучих веществ.*

### **Ключевые слова:**

*Региональная энергетика, топливный баланс, топливно-энергетический комплекс, бурый уголь, теплотехнические характеристики, показатели качества топлива.*

Несмотря на реализуемую в Дальневосточном федеральном округе масштабную Восточную газовую программу, уголь остается традиционно доминирующим видом топлива. Ежегодная потребность Дальнего Востока оценивается примерно в 30 млн т угля, что составляет в структуре топливного баланса всего региона значительную долю – на уровне 60 % [1, 2]. Доля твердого топлива в энергетическом балансе тепловых электрических станций (ТЭС), на которые приходится 75 % генерирующих мощностей региона, еще выше и достигает до 70 % [1]. Особо следует отметить тот факт, что более 20 % потребляемых федеральным окру-

гом твердых энергоресурсов ввозится извне, с угольных месторождений Кузнецкого и Канско-Ачинского бассейнов, т. е. с территорией Западной и Восточной Сибири [1]. Хотя Дальний Восток является обладателем, по разным источникам, от 25 до 40 % учтенных запасов различных марок углей на территории России, категория промышленных запасов, освоенных и находящихся на балансе угледобывающих предприятий региона, составляет всего около 10,6 % от общих запасов страны [1–3]. Объясняется данное состояние и различия публикуемых данных отчасти тем, что изученность минерально-сырьевой базы региона

по угольным залежаниям оценивается специалистами довольно низко – примерно от 2 до 9 % [1, 2]. Другой особенностью дальневосточной территории является наличие всего двух мощных угольных бассейнов, на которые приходится около 70 % всей добычи – на юге республики Саха-Якутия (Ленский бассейн) и в Приморском крае [1, 2, 4]. Остальные месторождения сравнительно небольшие и разбросаны по всей обширной территории региона. При этом Ленский бассейн сильно удален от потребителей географически, дальность доставки с месторождений Приморского края также является значительной [1–3].

Означенные проблемы напрямую влияют на конечную стоимость топлива и размер тарифов оплаты энергетических услуг. Транспортная составляющая на Дальнем Востоке в целом превышает 40 %, а, например, в Камчатском крае, Магаданской области и Чукотском автономном округе – 60 % [1, 4]. Особо остро это ощущается в Хабаровском крае, где самый большой объем ввозимых энергоносителей при высоких транспортных тарифах и растущих ценах на энергетическое сырье требует огромных финансовых и материальных затрат [4]. В результате ценовая нагрузка на потребителей электрической энергии в среднем по территории федерального округа в 1,7 раза выше среднероссийской, а тарифы на тепловую энергию выше средних по России в 2,2 раза [4]. Планируемый перевод многочисленных мазутных котельных Приморья на твердое топливо и программа по созданию замещающих их мощностей на Дальнем Востоке, в рамках которой должны быть построены или значительно расширены три ТЭЦ, работающие на угле (в Благовещенске, Уссурийске и Советской гавани), значительно увеличит потребность региона в твердых энергоресурсах и как следствие усугубит связанные с этим экономические задачи [4, 5].

Одним из путей снижения транспортной составляющей в стоимости твердого топлива можно рассматривать вариативность источников снабжения энергоресурсами за счет угольных месторождений, расположенных территориально значительно ближе к российскому Дальнему Востоку, чем месторождения Восточной Сибири.

Известно, что Монголия входит в число первых в мире стран по запасам твердых горючих ископаемых, располагая геологическими угольными запасами порядка 150...162 млрд т (при разведанных от 10 до 24 млрд т), которые содержатся в 140 известных месторождениях, различных как по классификации, так и по степени разведанности [6, 7]. В сопоставлении с запасами всего Дальневосточного федерального округа (по разным источникам, порядка 19 млрд т, из них промышленные запасы исчисляются примерно 1,9 млрд т [1–3]) это выглядит довольно перспективно как для экономической, так и для технической проработки. При этом учитывая жизненную необходимость для Монголии поставок российских электрических мощно-

стей [6], вариант расчета за электроэнергию углем и/или взаимозачет также стоит рассматривать как экономически достойный внимания. В качестве наиболее перспективного можно рассмотреть одно из крупнейших по запасам в Монголии угольное месторождение Шивэ-Овоо [6–8].

Шивэ-Овооское бурогольное месторождение, расположенное в Гоби-Сумберском аймаке (около 400 км от г. Улан-Батор), занимает второе место по объему и значению в Монголии, после Баганурского. Это геологически сравнительно молодое месторождение, средняя толщина угольного пласта – 50,4 м, геологические запасы – 2,7 млрд т, из них утвержденные производственные запасы – 564,1 млн т. Месторождение находится в пределах северо-восточного окончания Чойренской депрессии, обрамленной осадочными магматическими образованиями допалеозоя, палеозоя и мезозоя. В геологическом строении месторождения участвуют отложения Баян-Эрхэтинской и Тэвшийнской свит, а также Тэвшийнговской свиты, в пределах месторождения у которой выделяют 5 литологических горизонтов: подугленосный, нижнеугленосный, межугленосный, верхнеугленосный, надугленосный [6–8].

На месторождении Шивэ-Овоо были вскрыты и изучены два крупных угольных горизонта – верхний и нижний. Они имеют сравнительно простое строение, что определяет пригодность для добычи открытым способом. Подугленосный горизонт является самой нижней непродуктивной зоной Тэвшийнговской свиты. Он выходит на поверхность по окраинам депрессии, обрамляя широкую полосу вышележащие продуктивные отложения. Горизонт представлен чередованием зеленовато-серых алевролитов с серыми песчаниками. Средняя мощность его по керновым данным составляет 93 м. Нижнеугленосный горизонт выходит на поверхность с северной части Шивэ-Усского участка, а остальная часть перекрыта отложениями верхнего мела – кайнозоя. Средняя его мощность – 48 м. Межугленосный горизонт сложен преимущественно серыми и темно-серыми алевролитами. Средняя мощность горизонта составляет 57 м. Верхнеугленосный горизонт включает от 3 до 10 угольных пластов, разделенных пачками алевролитов и песчаников серого цвета. Средняя суммарная мощность отложений горизонта составляет 80 м. Надугленосный горизонт сложен песчаниками и алевролитами темного и серого цвета. Вскрытая мощность горизонта – 108 м, коэффициент вскрыши составляет – 2...3 м<sup>3</sup>/т [6–8].

Принятие решения об использовании угольной массы, извлекаемой из месторождения, как энергетического топлива для крупных действующих или планируемых ТЭС зависит от многих факторов, главными из которых являются теплотехнические свойства твердого топлива. Используемое котельное оборудование, системы подготовки топлива к сжиганию, оснащение топливно-транспортного хозяйства (машины, механизмы и

устройства), а главное – технологическая схема работы тепломеханической части проектируемой ТЭС создаются, рассчитываются и испытываются на использование (сжигание) топлива с четко определенными физико-химическими свойствами, являющимися показателями качества. Качество поставляемого на электростанции угля должно соответствовать действующим нормативным документам, т. е. государственным стандартам и техническим условиям, из чего вытекает необходимость правильного и точного определения марки, свойств и характеристик топлива, планируемого к использованию на ТЭС [9]. Теплотехнические характеристики топлива являются одной из важнейших групп свойств, влияющих на качество сжигаемого угля. Соответственно качество информации о них будет влиять на расчет технико-экономических показателей работы ТЭС и достоверность определения фактического удельного расхода топлива на выработку электроэнергии и тепла. Кроме того, все стандартизированные характеристики топлива оказывают большое влияние на работу основного и вспомогательного оборудования и в конечном итоге существенно влияют на величину прибыли, получаемой ТЭС.

Например, высокие показатели зольности на данном этапе указывают: на возникновение угрозы повышенного шлакования поверхностей нагрева котла, что повлечет за собой снижение его номинальной паропроизводительности; на значительный абразивный износ оборудования, что осложнит работу систем пылеприготовления и золо-шлакоудаления; на увеличение выбросов золы в атмосферу и количества золошлаковых остатков, удаляемых на золоотвалы, что, в свою очередь, приводит к повышению затрат ТЭС (платы за выбросы, за землю под золоотвалом и т. д.).

Значение влажности топлива оговаривается в договорах на поставку по следующим соображениям: повышение содержания влаги требует дополнительных затрат тепла на сушку пыли перед ее подачей в топку; беспрепятственное прохождение топлива по тракту топливоподачи зависит от сыпучести топлива, которая прежде всего напрямую зависит от влажности (при определенном значении влагосодержания топливо полностью теряет сыпучие свойства); влажность оказывает решающее влияние на склонность топлива к слеживанию и зависанию в бункерах, а также к забиванию пересыпных коробов в узлах пересыпки топливоподачи; от влажности зависит смерзаемость топлива при длительном пребывании на морозе в вагонах или на открытых складах.

От содержания легковозгоняющихся компонентов органической массы зависит выбор типа углеразмольного оборудования и горелочных устройств, а также объем мероприятий по обеспечению пожаро-взрывобезопасности. Выход летучих веществ оказывает влияние на устойчивость зажигания и горения топлива в топках котлов, в особенности при работе на сниженных нагрузках.

Содержание серы в топливе указывает на возможность возникновения коррозии поверхностей нагрева котлов в процессе эксплуатации основного оборудования ТЭС и потенциальную загазованность окружающей среды выбросами оксидов серы в составе продуктов сгорания (дымовых газов).

С целью оценки эксплуатационных свойств угля на лабораторной базе Энергетического института Томского политехнического университета продолжены комплексные исследования теплотехнических показателей товарных партий углей Шивэ-Овооского месторождения [10], сводные (усредненные) результаты которых представлены в табл. 1. Отбор, подготовка и исследование аналитических проб производились в полном соответствии со стандартизированными российскими методиками (ГОСТ 10742, ГОСТ 27314, ГОСТ 11014, ГОСТ 11022, ГОСТ 6382, ГОСТ 28743, ГОСТ 6389, ГОСТ 8606, ГОСТ 147).

В целом результаты разных этапов проведенных исследований показывают удовлетворительную сходимость, что согласно применявшимся стандартизированным методикам является достаточным показателем достоверности.

Содержание влаги в рабочем состоянии всех исследованных проб является значительным (в диапазоне от 28 до 40 %), но большая часть общей влаги (от 70 до 80 %) представлена внешней составляющей. Такая картина разделения на составляющие влажности, а также наблюдения за хранением угля в ходе проведения исследований позволяют предсказать благоприятную способность углей к осушению в естественных условиях (для примера, на открытых складах ТЭС).

Рабочая зольность всего массива исследованных проб попадает в узкий диапазон с пределами примерно от 7 до 9 %, что позволяет отнести угли месторождения, представленные данными товарными партиями, к группе малозольных.

Количество углерода в сухой беззольной массе угля преобладает и доходит до 77 %. Это, в свою очередь, определяет значительную величину теплоты сгорания сухой беззольной массы, достигающей более 26 МДж/кг. Наряду с низшей теплотой сгорания, которая для рабочей массы в среднем составляет 14,8 МДж/кг, все полученные характеристики теплотворной способности подтверждают перспективность данного месторождения в качестве источника энергетического топлива.

Другие компоненты элементного состава топлива содержатся в незначительном количестве, за исключением кислорода. Однако при этом следует обратить особое внимание на содержание серы, которое в рабочей массе топлива у отдельных проб достигает 0,9 % (отмечены фрагменты с содержанием серы более 1 %). В связи этим и учитывая влияние серы на все системы технологий топливосжигания, важно иметь представление о разновидностях группового состава сернистых соединений (табл. 2).

Хотя по содержанию серы и её разновидностей исследованные пробы заметно различаются, что указывает на неравномерность распределения сернистых соединений по угольному массиву месторождения, в целом уголь следует относить к группе среднесернистых. При этом основная доля содержащейся серы (от 75 до 99,9 %) представлена колчеданными и органическими соединениями.

Во всех пробах выявлено довольно высокое значение (в среднем на уровне 50 %) выхода летучих веществ. Это свидетельствует о том, что органическая часть угля состоит в основном из соединений,

легко разлагающихся на газообразные продукты при термическом воздействии, что характеризует уголь как высокорекреакционный.

Полноте картины при оценке с технических позиций перспективности использования углей как энергетического топлива и пригодности их для конкретных технологий сжигания способствует сравнение полученных результатов с известными данными о других, сходственных по отдельным признакам углях (табл. 3). В качестве таковых выбран ряд бурогоугольных месторождений, географически относящихся к рассматриваемому региону

Таблица 1. Состав и теплотворная способность угля

Наименование характеристики	Состояние (масса)	Обозначение	Код образца									
			I этап			II этап			III этап			
			1	1	2	3	1	2	3	4	5	
Влажность, %	Рабочее (рабочая)	$W^r$	40,50	33,30	29,80	31,20	29,25	28,56	28,06	28,30	28,01	
	Внешняя	$W^{ext}$	32,50	24,8	20,60	20,30	21,59	20,83	20,69	20,55	19,88	
Зольность, %	Сухое (сухая)	$A^d$	11,70	12,96	12,67	12,10	11,87	11,62	10,94	10,90	10,70	
	Рабочее (рабочая)	$A^r$	6,90	8,60	8,89	8,30	8,39	8,30	7,87	7,86	7,70	
Выход летучих веществ, %	Сухое беззольное (горючая)	$V^{daf}$	41,30	42,20	42,70	40,30	51,54	51,45	51,12	50,27	49,73	
Вид коксового остатка	—	—	порошкообразный									
Теплота сгорания высшая	МДж/кг (Ккал/кг)	Рабочее (рабочая)	$Q_s^r$	14,94	16,01	16,36	16,72	14,83	15,40	15,85	16,13	16,90
				3565,90	3820,90	3904,25	3990,45	3539,38	3675,42	3782,82	3849,64	4033,41
Теплота сгорания низшая	МДж/кг (Ккал/кг)	Рабочее (рабочая)	$Q_f^r$	13,51	14,69	15,11	15,61	13,81	14,39	14,80	15,11	15,88
				3225,30	3504,70	3605,80	3724,29	3295,94	3434,37	3532,22	3606,21	3789,76
	МДж/кг (Ккал/кг)	Сухое беззольное (горючая)	$Q^{daf}$	28,50	27,60	26,68	27,50	23,82	24,41	24,76	25,29	26,32
				6807,30	6584,90	6368,50	6566,25	5684,96	5825,77	5909,08	6035,80	6281,62
Элементный состав, %	Рабочее (рабочая)	$C^r$	32,92	39,04	39,80	41,49	47,25	48,87	49,16	49,27	49,76	
		$H^r$	2,63	2,33	2,36	2,47	3,13	3,19	3,00	2,94	3,02	
		$N^r$	0,42	0,49	0,52	0,59	0,57	0,55	0,52	0,53	0,55	
		$S^r$	0,52	0,60	0,63	0,64	0,91	0,56	0,34	0,45	0,32	
		$O^r$	16,11	15,64	18,00	15,31	10,50	9,97	11,05	10,63	10,64	
	Сухое беззольное (горючая)	$C^{daf}$	62,65	75,00	68,68	68,58	75,78	77,41	76,72	77,20	77,40	
		$H^{daf}$	5,01	4,48	4,07	4,08	5,02	5,05	4,68	4,61	4,70	
		$N^{daf}$	0,80	0,94	0,90	0,98	0,92	0,87	0,82	0,83	0,86	
		$S^{daf}$	0,99	1,16	1,08	1,05	1,45	0,89	0,53	0,71	0,49	
		$O^{daf}$	30,55	18,42	25,27	25,31	16,83	15,78	17,25	16,65	16,55	

Таблица 2. Групповой состав сернистых соединений

Наименование характеристики	Состояние (масса)	Обозначение	Код образца (этап)									
			I		II				III			
			1	1	2	4	6	7	8	9	10	
Разновидности серы, %: общая ( $S_{общ}$ ), сульфатная ( $S_s$ ), пиритная (колчеданная) ( $S_k$ ), органическая ( $S_{орг}$ ).	Рабочее (рабочая)	$S_{общ}^r$	0,52	0,60	0,63	0,59	0,78	0,39	1,77	0,37	0,28	
		$S_s^r$	0,12	0,12	0,16	0,15	0,18	<0,01	0,10	0,02	0,03	
		$S_k^r$	0,17	0,20	0,19	0,20	0,31	0,29	1,19	0,10	0,09	
		$S_{орг}^r$	0,23	0,28	0,28	0,24	0,29	0,10	0,48	0,25	0,16	
	Сухое беззольное (горючая)	$S_{общ}^{daf}$	1,03	1,00	1,04	0,98	1,25	0,61	2,75	0,59	0,44	
		$S_s^{daf}$	0,23	0,21	0,26	0,25	0,29	<0,01	0,16	0,04	0,05	
		$S_k^{daf}$	0,35	0,32	0,31	0,33	0,49	0,46	1,84	0,16	0,14	
		$S_{орг}^{daf}$	0,45	0,47	0,47	0,40	0,47	0,15	0,75	0,39	0,25	



**Таблица 3.** Характеристики шивэ-овооского угля в сравнении с углями других бурогольных месторождений

Наименование характеристики рабочей массы	Обозначение	Шивэ-Овоо	Ирша-Бород.	Березовское	Баганурское	Азейское	Павловское	Таловское
Марка	–	2Б (3Б)	2Б	2Б	2Б	3Б	1Б	1Б, 2Б, 3Б
Влажность, %	$W$	28–40	33	33	30–35	25	41,5	29,4–59,6
Зольность сухой массы, %	$A^d$	12,3	5,9	5,7	12,5	6,8	33,5	24,62
Выход летучих веществ, %	$V^{daf}$	40,3–51,54	51,4	53,7	43,9	46,3	58,0	61,4
Элементный состав сухой, беззольной массы, %	$C^{daf}$	73,27	73,6	71,2	72,30	74,2	66,06	65,2
	$H^{daf}$	4,63	4,9	5,1	4,60	5,5	5,91	4,7
	$N^{daf}$	0,88	0,96	1,1	1,0	1,3	0,77	1,8
	$S^{daf}$	0,93	0,26	0,32	1,18	0,5	1,03	0,8
	$Q^{daf}$	20,3	20,28	22,28	20,92	19,0	26,22	27,5
Теплота сгорания низшей рабочей массы, МДж/кг	$Q_f^l$	14,82	15,28	15,66	14,6	15,99	9,13	9,13

или соседствующих с ним, а также тяготеющих по ареалу распространения поставок топлива [7, 11–13]: Березовское и Ирша-Бородинское Канско-Ачинского бассейна, наиболее масштабного используемые в российской энергетике; Баганурское, крупнейшее по запасам, по энергетическому и коммунальному использованию в Монголии; Азейское Иркутского бассейна и Павловское Приморского края, достаточно освоенные на ТЭС Дальневосточной генерации. Кроме того, к сравнительному анализу привлечены данные по относительно небольшому Таловскому месторождению (Томская область), которое не считается перспективным для прямого использования на ТЭС [14].

Можно видеть, что сравнение с бурыми углями других месторождений подтверждает сделанные выше в целом благоприятные для энергетического использования оценки теплотехнических свойств

шивэ-овооского угля, которые сопоставимы со свойствами освоенных и широко используемых в российской теплоэнергетике углей.

Некоторое исключение из этого ряда представляет собой элементный состав с более высоким содержанием серы, что, по-видимому, является одной из особенностей месторождений Монголии.

#### Выводы

1. Исследованиями товарных партий угля месторождения Шивэ-Овоо установлены теплотехнические характеристики, соответствующие условиям для энергетического использования.
2. По совокупности полученных теплотехнических характеристик уголь относится к классификационному типу бурых (марка 2Б, 3Б) и среднесернистых, отличается невысокой зольностью (до 13 % от сухой массы).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садаринов И.В. Топливо-энергетический комплекс Дальнего Востока в системе ТЭК России. – М.: Изд-во МГТУ, 2006. – 294 с.
2. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 2. Регионы и бассейны / под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: Изд-во МГТУ, 1999. – 445 с.
3. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие / под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: Изд-во МГТУ, 1999. – 648 с.
4. Ишаев В.И. Топливо-энергетический комплекс: сдерживающий фактор экономического роста или основа модернизации экономики Дальнего Востока // ДЭП. 2013. URL: <http://dalen-ergy.ru/2010/12/11172> (дата обращения: 20.12.2013).
5. Клименко О. Энергетике Дальнего Востока, потратившейся на газификацию ключевых ТЭЦ, Путин потребовал подбросить угля // ZRPRESS.ru. 2013. URL: <http://zrpress.ru/zr/2013/37> (дата обращения: 20.12.2013).
6. Энхжаргал Х. Разработка научных основ создания экологически чистой угольной ТЭС на принципе мультикомплекса, обеспечивающей интеграцию электроэнергетической системы Монголии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Иркутск, 2012. – 40 с.
7. Страхов В.М., Масгутов И.И. Угли Монголии и инфраструктура отрасли // Кокс и химия. – 2012. – № 4. – С. 46–51.
8. Батхуяг С., Нуурей Б., Энхжаргал Х. О возможностях расширения энергетического сотрудничества Монголии со странами Северо-Восточной Азии // Объединенный симпозиум 2010 – Энергетические связи между Россией и Восточной Азией: стратегия разви-

тия в XXI веке. 2010. URL: <http://www.sei.irk.ru/symp2010/papers/RUS/P2-04r.pdf> (дата обращения: 20.01.2011).

9. Пособие для изучения «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей». Тепломеханическая часть. – М.: Изд-во Энас, 2012. – 416 с.
10. Некоторые результаты исследования угля Шивэ-Овооского месторождения Монголии с целью его энергетического использования / Х. Энхжаргал, С. Батмунх, А.С. Заворин, В.В. Саломатов, А.Ю. Долгих // Энергетика и теплотехника: Сб. научных трудов / под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. Вып. 14. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 125–132.
11. Комплексная переработка бурых углей Монголии и России с получением гуминовых препаратов, малозольных углеродных восстановителей и углебрикетов / Д. Оюунболд, А.М. Сыроежко, Н.В. Славошевская, В.М. Страхов // Кокс и химия. – 2010. – № 3. – С. 26–31.
12. Битумы бурых углей некоторых месторождений Монголии и России / Д. Оюунболд, А.М. Сыроежко, Н.В. Славошевская, В.М. Страхов // Кокс и химия. – 2010. – № 2. – С. 32–38.
13. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
14. Теплотехнические свойства углей Таловского месторождения Томской области / А.С. Заворин, С.К. Карякин, С.Г. Маслов, В.И. Николаева, С.Х. Сиразитдинова, О.А. Ласовская // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 131–136.

Поступила 20.12.2013 г.



UDC 662.642:621.18:621.311.22

## COMBUSTION CHARACTERISTICS OF SHIWEI-OVOO COAL DEPOSITS IN MONGOLIA FOR ENERGY CONSUMPTION

**Aleksandr S. Zavorin,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30.

E-mail: zavorin@tpu.ru

**Aleksandr Yu. Dolgikh,**

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30.

E-mail: ShuraD@tpu.ru

**Vladimir V. Salomatov,**

Dr. Sc., Institute of Heat Physics, SB RAS,

Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev avenue, 1.

E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Sereeter Batmunkh,**

Dr. Sc., Mongolian University of Science and Technology,

Mongolia, 210646, Ulaanbaatar, Sukhbaatar District, Baga Toiruu, 34.

E-mail: batmunkh\_acad@yahoo.com

**Khaltaryn Enkhzhargal,**

Dr. Sc., Mongolian University of Science and Technology,

Mongolia, 210646, Ulaanbaatar, Sukhbaatar District, Baga Toiruu, 34.

E-mail: enkhjargal@must.edu.mn

*Pricing pressure on energy consumers of the Far Eastern Federal District is significantly higher than the national average one and it is determined to a great extent by transport cost of solid fuel import. That's why consideration of engineering issues of substitution of the region's energy supply sources with the nearest coal fields is important. For making a decision of using coal as energy fuel required comprehensive information about it: complex of its properties, such as thermal characteristics. For this purpose the authors have investigated Shiwei-Ovoo coal consignments using standardized Russian methods. The comparison of the results with quality indicators of coals widely used in the Russian thermal power confirms Shiwei-Ovoo coal as generally favorable for energy use. Thermal properties of Shiwei-Ovoo coal were estimated. It is classified as lignite with high yield of volatiles, medium sulfur and low ash content.*

### Key words:

*Regional power, fuel balance, fuel and energy complex, lignite, thermal performance, quality indicators of the fuel.*

### REFERENCES

1. Sadardinov I.V. *Toplivno-energeticheskiy kompleks Dalnego Vostoka v sisteme TEK Rossii* [Fuel and energy complex of the Far East in the system of FEC of Russia]. Moscow, MGGU Publ., 2006. 294 p.
2. *Mineralno-syrevaya baza ugolnoy promyshlennosti Rossii. Regiony i bassejny* [Mineral reserve base of coal industry in Russia. Regions and bassins]. Ed. by A.E. Evtushenko, Yu.N. Malysheva. Moscow, MGGU Publ., 1999. Vol. 2, 445 p.
3. *Mineralno-syrevaya baza ugolnoy promyshlennosti Rossii. Sostoyaniye, dinamika, razvitiye* [Mineral reserve base of coal industry in Russia. State, dynamics, development]. Ed. by A.E. Evtushenko, Yu.N. Malysheva. Moscow, MGGU Publ., 1999. Vol. 1, 648 p.
4. Ishaev V.I. Toplivno-energeticheskiy kompleks: sderzhivayushchiy faktor ekonomicheskogo rosta ili osnova modernizatsii ekonomiki Dalnego Vostoka [Fuel and energy complex: constraining factor of economical growth or the base of modernization of the Far East economy]. *DEP*. 2013. Available at: <http://dalenergy.ru/2010/12/11172> (accessed 20 December 2013).
5. Klimenko O. Energetike Dalnego Vostoka, potrativsheysya na gazifikatsyu klyuchevykh TEC, Putin potreboval podbroisit uglya [Putin required to pile coal to the power economy of the Far East paying much for the main FEC gasification]. *ZRPRESS.ru*. 2013. Available at: <http://zrpress.ru/zr/2013/37> (accessed 20 December 2013).
6. Enkhzhargal Kh. *Razrabotka nauchnykh osnov sozdaniya ekologicheskoi chistoy ugolnoy TES na printsipe multikompleksa, obespechivayushchey integratsiyu elektroenergeticheskoy sistemy Mongolii. Avto-ref. dis. dokt. tehn. nauk* [Development of scientific bases for establishing environmentally safe coal TPS on multi-complex principle supporting integration of power-engineering system of Mongolia. Dr. Diss. abstract]. Irkutsk, 2012. 40 p.
7. Strakhov V.M., Masgutov I.I. Ugli Mongolii i infrastruktura otrasli [Mongolian coals and regional infrastructure]. *Koks i khimiya*, 2012, no. 4, pp. 46–51.
8. Batkhuyag S., Nuurey B., Enkhzhargal Kh. O vozmozhnostyakh rasshireniya energeticheskogo sotrudnichestva Mongolii so stranami Severo-Vostochnoy Azii [Possibilities of increasing Mongolia power cooperation with countries of North East Asia]. *Obedinenny simpozium 2010 – Energeticheskie svyazi mezhdru Rossiyey i Vostochnoy Aziey: strategiya razvitiya v XXI veke* [Power relations of Russia and east Asia: development strategy in XXI century. Symposium]. 2010. Available at: <http://www.sei.irk.ru/symp2010/papers/RUS/P2-04r.pdf> (accessed 20.01.2011).

9. *Posobie dlya izucheniya «Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey». Teplomekhanicheskaya chast* [Manual for studying the regulations of technical maintenance of electric stations and systems. Thermo mechanical part]. Moscow, Enas Publ., 2012. 416 p.
10. Enkhzhargal H., Batmunkh S., Zavorin A.S., Salomatov V.V., Dolgikh A.Yu. Nekotorye rezultaty issledovaniya uglya Shivye-Ovooskogo mestorozhdeniya Mongolii s tselyu ego energeticheskogo ispolzovaniya [Some results of studying coal of Shive-Ovoo deposit in Mongolia for its power application]. *Energetika i teplotekhnika* [Power engineering and heat engineering]. Ed. by academician of RAS V.E. Nakoryakov. Novosibirsk, NGTU Publ, 2009. Iss. 14, pp. 125–132.
11. Oyuunbold D., Syroezhko A.M., Slavoshevskaya N.V., Strakhov V.M. Kompleksnaya pererabotka burykh ugley Mongolii i Rossii s polucheniem guminovykh preparatov, malozolnykh uglerodnnykh vosstanoviteley i uglebriketov [Complex processing of lignite of Mongolia and Russia for obtaining humic products, low-ash carbon chemical reducers and coal briquettes]. *Koks i khimiya*, 2010, no. 3, pp. 26–31.
12. Oyuunbold D., Syroezhko A.M., Slavoshevskaya N.V., Strakhov V.M. Bitumy burykh ugley nekotorykh mestorozhdeniy Mongolii i Rossii [Bitumen of lignite of some deposits in Mongolia and Russia]. *Koks i khimiya*, 2010, no. 2, pp. 32–38.
13. *Teplovoy raschet kotelnykh agregatov (normativny metod)* [Thermal calculation of boiler units (standard technique)]. Saint Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p.
14. Zavorin A.S., Karyakin S.K., Maslov S.G., Nikolaeva V.I., Sirazitdinova S.Kh., Lasovskaya O.A. Teplotekhnicheskie svoystva ugley Talovskogo mestorozhdeniya Tomskoy oblasti [Thermal characteristics of coals of Talovskoe deposit in Tomsk region]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 131–136.

УДК 62-665.9

## КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА С ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ВНУТРИЦИКЛОВОЙ КОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

**Казаков Александр Владимирович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры парогенераторостроения  
и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

**Заворин Александр Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения  
и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Новосельцев Павел Юрьевич,**

инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: pavel2906@rambler.ru

**Табакаев Роман Борисович,**

инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

*Разработка энергетических установок для энергоснабжения децентрализованных потребителей составляет актуальную задачу научных исследований и подтверждается современным вектором развития малой энергетики.*

**Цель исследования:** разработка и технико-экономическое обоснование освоения инновационных технологий энергетического использования низкосортных топлив в малой энергетике в когенерационных установках с топливным элементом. В работе использованы экспериментальные и расчётные методы исследований. Создана экспериментальная модель когенерационной энергоустановки, позволяющая проверять принцип действия и определять характеристики разрабатываемых технических решений когенерационной энергоустановки. На экспериментальной модели проведены исследования, результаты которых положены в основу расчёта конструкции энергоустановки. По итогам проектирования энергоустановки выполнена её технико-экономическая оценка.

**Результаты:** разработана конструкция энергетической установки и предложено технико-экономическое обоснование целесообразности её внедрения. В качестве выводов отмечено: разработана новая конструкция когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения; капитальные затраты на производство когенерационных установок превосходят стоимость существующих дизельных электростанций, однако низкие эксплуатационные затраты, определяемые стоимостью топлива, приводят к быстрой окупаемости затрат; бюджетная эффективность проекта по замещению действующего парка дизельных электростанций когенерационными установками определяется экономией затрат на топливную составляющую в процессе выработки электроэнергии, которая может достигать уровня 73 млн р./год; ожидаемый интегральный эффект от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области в течение 5 лет находится на уровне 255 млн р., что свидетельствует об экономической целесообразности тиражирования когенерационных установок.

### **Ключевые слова:**

Когенерационная энергоустановка, топливный элемент, внутрицикловая конверсия, органическое сырьё, автономное энергообеспечение.

### **Введение**

Актуальность вопросов использования местных низкосортных топлив обеспечивается соответствием современным тенденциям энергосбережения, в частности направлению вовлечения в топливный энергетический баланс низкосортных топлив и обеспечения электро- и теплоэнергией районов децентрализованного энергоснабжения [1–3]. Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [1], целью которой является максимально эффективное использование при-

родных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению её внешнеэкономических позиций, в качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетическом секторе по направлению «Возобновляемые источники энергии и местные виды топлива» выделены следующие:

- развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, а также много-

функциональных энергетических комплексов для автономного энергообеспечения потребителей в районах, не подключённых к сетям централизованного энергоснабжения;

- расширение производства и использования новых видов топлива, получаемых из различных видов биомассы.

Предполагается [1], что к 2030 г. в Центральном, Южном, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах возрастёт роль использования местных источников энергии, производство на их основе энергии в удалённых и изолированных районах. Доля тепла, производимого на теплоэлектроцентралях в системах централизованного теплоснабжения, уменьшится с 43 (2005 г.) до 35 %. Эту нишу должны занять газотурбинные установки на теплоэлектроцентралях и автономные теплоснабжающие установки. Малоэтажная застройка, как правило, должна будет обеспечиваться индивидуальными теплогенераторами. Для достижения этих целей необходима модернизация и развитие систем децентрализованного теплоснабжения с применением высокоэффективных конденсационных газовых и угольных котлов, когенерационных, геотермальных, теплонасосных и других установок, а также автоматизированных индивидуальных теплогенераторов нового поколения для сжигания разных видов топлива.

Одной из основных проблем [1] в региональной энергетической политике является недостаточное развитие малой энергетики и низкая вовлечённость в энергодолансы местных источников энергии регионального и локального значения, решение которой предполагает максимизацию экономически эффективного использования местных источников топливно-энергетических ресурсов, развитие экономически эффективных децентрализованных и индивидуальных систем теплоснабжения. Для этих целей предполагается:

- стимулирование использования местных топливно-энергетических ресурсов (возобновляемые источники энергии, местные виды топлива, отходы и прочее) с последующим их вовлечением в региональные топливно-энергетические балансы;
- оптимизация региональных систем теплоснабжения на основе экономически эффективного сочетания централизованного и децентрализованного теплоснабжения;
- доведение доли местных источников энергии в региональных топливно-энергетических балансах до 20 %;
- формирование устойчивой системы энергетического обеспечения труднодоступных и удалённых территорий на основе расширенного эффективного использования местных энергоресурсов;
- формирование региональных энергетических систем на основе экономически эффективного сочетания использования местных и привозных источников энергии.

В интересах развития российской энергетики, распространяемых в том числе и на объекты малой энергетики, следует развивать направление исследований в области генерации тепловой и электрической энергии для автономных децентрализованных потребителей. Как показывает практика, проблема децентрализованных потребителей заключается в удалённости от транспортных схем, чтократно увеличивает стоимость доставки топливных ресурсов. Зачастую в таких удалённых районах имеются запасы местных низкосортных топлив, которые можно использовать в качестве энергоносителя, но характеристики этих топлив настолько осложняют организацию процесса прямого сжигания в топках котлов, что на практике используются в редких случаях [4, 5].

Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределённая энергетика» гласит, что одними из основных сфер применения новых технологических решений малой распределённой энергетики являются [6]:

- когенерационные установки для модернизации коммунальной инфраструктуры поселений;
- типовые комплекты оборудования и модульные технологические решения для энергоснабжения удалённых и изолированных потребителей;
- комплексные локальные энергосистемы с максимально возможным использованием местных топливных ресурсов.

Одними из основных направлений технологического развития, поддерживаемыми в рамках технологической платформы, являются [6]:

- технологии генерации электрической и тепловой энергии, в том числе топливные элементы, водородная энергетика;
- технологии использования местных энергетических ресурсов, в том числе современные технологии использования торфа как топливного ресурса, газификация местных топливных ресурсов, отходов производства и бытовых отходов с использованием синтез-газа для генерации энергии.

Существующий уровень исследований в области вопросов газификации позволяет создавать установки, перерабатывающие как качественные угли, так и низкосортные топлива, но их масштабное внедрение ограничено конкурентными преимуществами действующих крупных станций. Газогенераторные технологии можно считать едва ли не единственным вариантом переработки низкосортных местных топлив в отдалённых децентрализованных районах [7].

Сегодня остро стоит вопрос об энергоснабжении децентрализованных потребителей как в коммунальном хозяйстве, так и в производстве. По данным [3], на территории Томской области было расположено 38 пунктов с населением 36 тыс. человек, электроснабжение которых осуществляется от дизельных электростанций (ДЭС), находящихся в муниципальной собственности администраций районов и переданных на обслуживание пред-



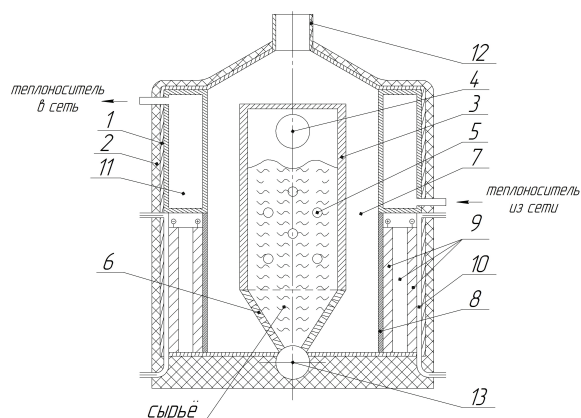
приятиям ЖКХ. Общий парк дизель-генераторных установок в муниципальных ДЭС насчитывал более 100 машин суммарной установленной мощностью 50 тыс. кВт, вырабатывающих порядка 50 млн кВт·ч электроэнергии при расходе дизельного топлива на сумму, превышающую 120 млн р. в ценах 2002 г. При этом все 38 населённых пунктов обладают собственными запасами низкосортных топлив. Использование когенерационных систем на основе двигателей внутреннего сгорания, сжигающих привозное дизельное топливо, является пережитком прошлого и требует замещения путём внедрения новых технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии из местных низкосортных топливных ресурсов [8, 9]. В связи с этим вполне закономерно ставить вопрос о вовлечении в топливно-энергетический баланс местных видов топлива. Таким образом, работы по темам, связанным с исследованиями в области энергоснабжения удалённых потребителей на базе когенерационных установок, генерирующих синтез-газ на основе местных топлив, с использованием топливных элементов, представляются актуальными [10].

Целью настоящих исследований является разработка и технико-экономическое обоснование освоения инновационных технологий энергетического использования низкосортных топлив в малой энергетике в когенерационных установках с топливным элементом.

#### Когенерационная энергоустановка

Основная идея исследованной технологии внутрициклового конверсии заключается в низкотемпературной внутрициклового термической переработке местных низкосортных топлив высокой влажности в пиролизёре и получении водородсодержащего синтез-газа путём применения высокоэффективной технологии паротепловой каталитической конверсии углерода топлива. Электрическая энергия вырабатывается топливным элементом, топливом для которого служит водородсодержащий газ, произведённый в процессе низкотемпературной внутрициклового конверсии местного низкосортного органического сырья [11]. Повышенная концентрация водорода при низкой забалансированности газов достигается за счёт отсутствия воздушного дутья с введением в зону реагирования перегретого пара и оксидов железа [12]. Тепловая энергия производится за счёт утилизации теплоты, выделяемой на топливном элементе, и в процессе доокисления пиролизных газов на каталитических элементах [13]. Повышение экономической эффективности и экологических показателей достигается за счёт комплексного использования побочных продуктов (углеродистый остаток, пиролизный конденсат) основного процесса в технологиях производства брикетного топлива [14–16]. Низкие температуры основных процессов позволяют менее требовательно подходить к выбору материалов для изготовления энергоустановки.

Когенерационная энергоустановка (рисунок) [17] имеет корпус – 1, покрытый теплоизоляцией – 2. Внутри корпуса размещён пиролизёр – 3, представляющий собой сосуд цилиндрической формы, в верхней части которого смонтировано устройство – 4 для непрерывной подачи топлива. По всему объёму пиролизёра выполнены каналы – 5 для ввода газифицирующего агента. Нижняя часть пиролизёра соединена с конусообразной колосниковой решёткой – 6. Пиролизёр совмещён с газовой камерой сгорания – 7, в нижней части которой расположена металлическая сетка – 8 с нанесённым на неё катализатором. За металлической сеткой расположен кислородно-водородный топливный элемент – 9 и воздушная камера – 10. В верхней части корпуса на выходе дымовых газов предусмотрены теплообменник – 11 и дымовая труба – 12. Зольный остаток, образующийся при пиролизе твёрдого топлива в пиролизёре, удаляется системой золоудаления – 13 [18, 19].



**Рисунок.** Когенерационная энергоустановка: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – пиролизёр; 4 – подача топлива; 5 – ввод газифицирующего агента; 6 – колосниковая решётка; 7 – камера сгорания; 8 – катализатор; 9 – топливный элемент; 10 – воздушная камера; 11 – теплообменник; 12 – дымовая труба; 13 – система золоудаления

Принцип работы энергоустановки заключается в следующем: пиролизёр заполняется топливом через устройство для подачи топлива, после этого по каналам ввода газифицирующего агента из внешнего парогенератора подаётся перегретый пар с температурой 300...500 °С. В ходе процесса низкотемпературного пиролиза выделяется обогащённый водородом газ, поступающий в газовую камеру сгорания через колосниковую решётку. В газовой камере водород реагирует с катализатором, нанесённым на металлическую сетку, и топливным элементом, омываемым воздухом из воздушной камеры. В результате чего топливный элемент вырабатывает электрический ток. Доокисление горючих газов происходит на катализаторах, нанесённых на поверхность теплообменника. При этом происходит выделение тепла для нагрева сетевого теплоносителя посредством конвекционного теплообмена. Охлаждённые дымовые газы покидают

установку через дымовую трубу. В качестве катализатора использованы нанопорошки ( $\text{Ni}+\text{NiO}$ ,  $75\text{ZrO}_2+25\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiF}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $10\text{SrO}+90\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $85\text{ZrO}_2+15\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [20]. Верхний температурный предел работы установки выбран из соображения использования в технологическом процессе углеродистых сталей, способных работать при температурах до  $500^\circ\text{C}$ , что позволяет снизить стоимость когенерационной энергоустановки.

Конструкторский расчёт проводился для установки, использующей в качестве топлива торф с характеристиками: влажность 30,1 %, зольность 4,5 %, теплота сгорания 8,1 МДж/кг. Результатами расчёта являются расходные характеристики и основные геометрические размеры установок (табл. 1).

**Таблица 1.** Расчётные параметры установки на 100 кВт электрической и 100 кВт тепловой мощности

Параметр	Значение параметра
Расход топлива, кг/ч	116
Диаметр установки, м	1,1
Высота установки, м	3,0
Размер угольного электрода (d×h), м×м	0,07×1
Количество электродов, шт.	80
Количество теплообменных труб, шт.	246

Определение экономического эффекта от замены парка ДЭС на когенерационные установки произведено сопоставлением ежегодных затрат на содержание ДЭС и тех выгод, в денежном выражении, которые могут быть получены от использования когенерационных установок. Для этого определено:

- затраты на производство и эксплуатацию когенерационных установок;
- бюджетная эффективность замещения ДЭС когенерационными установками;
- анализ чувствительности, в зависимости от сценариев развития проекта;
- ожидаемый интегральный эффект.

#### Технико-экономическая эффективность

В качестве метода анализа эффективности внедрения инновационных энергетических технологий на основе когенерационных установок выбран алгоритм из работы [21], посвящённой созданию инструментов оценки эффективности инвестиций в инновационные энерготехнологии. Алгоритм основан на комплексной оценке энергопотребления, энергоресурсов, новой технологии и экологии. На основе данного алгоритма проведена сравнительная эффективность внедрения новых когенерационных установок и существующих ДЭС.

Для оценки энергопотребления и энергоресурсов удалённых населённых пунктов в первую очередь определяется потребность в топливе и выполняется анализ возможностей добычи энергоресурсов. Для этого анализа выполняется предварительная технико-экономическая оценка, подразуме-

вающая оценку экологической обстановки в районе и прогноз технико-экономических показателей местных энергоресурсов. В случае отрицательных результатов технико-экономической оценки делается вывод о нецелесообразности инвестирования выбранных энергетических технологий. В случае положительных результатов формируется сценарий освоения инновационных энергетических технологий. После этого, исходя из оценки экологической обстановки, делается вывод об уменьшении или увеличении вредных выбросов с применением новых технологий. В случае превышения предыдущих показателей по вредным выбросам делается вывод о нежелательности использования этих технологий и их внедрение отклоняется. При уменьшении этих выбросов, и исходя из сформированных сценариев освоения инновационных энерготехнологий, выполняется оценка общей эффективности и масштабов тиражирования этих технологий. При отрицательных результатах этой оценки технологии считаются неэффективными. В случае положительных результатов выполняется анализ коммерческой и бюджетной эффективности, предотвращённого экологического ущерба. Оценка коммерческой эффективности включает в себя идентификацию рисков освоения новых технологий, анализ чувствительности, определение границ безубыточности, определение ожидаемого интегрального эффекта от освоения технологии в рамках границ безубыточности. При положительном интегральном эффекте принимается решение о целесообразности проекта. В случае отрицательного интегрального эффекта выполняется оценка коммерческой эффективности с учётом возможных сторонних инвесторов. Если по результатам этой оценки даже с учётом инвесторов ожидаемый интегральный эффект остаётся отрицательным, то проект считается нецелесообразным.

Затраты на когенерационные установки определяются капитальными затратами (252 тыс. р.) и ежегодными расходами на поддержание работоспособного состояния (47 тыс. р.). Капитальные (единовременные) затраты на когенерационные установки определяются величиной затрат на заработную плату, затрат на материалы, накладных расходов, затрат на оборудование. Эксплуатационные затраты в данном случае определяются величиной затрат на текущий ремонт и воду. Столь низкие эксплуатационные затраты в первую очередь объясняются отсутствием топливной составляющей при условии административно-правового содействия в реализации программы замещения ДЭС когенерационными установками. В случае возникновения затрат на топливо ниже приведён соответствующий расчёт показателей. Ежегодные затраты на топливо для ДЭС мощностью 100 кВт (согласно [3]) составляют порядка 240 тыс. р. Из этого следует, что экономия на эксплуатационных затратах составляет 193 тыс. р. при работе одной установки мощностью 100 кВт при капитальных затратах 252 тыс. р.

На основе результатов по затратам определены показатели инвестиционной деятельности (табл. 2) в расчёте на 100 кВт установленной мощности. Здесь чистый дисконтированный доход (*NPV*) определяется разницей между экономией затрат (*D<sub>t</sub>*) при внедрении когенерационных установок с учётом ставки дисконтирования (*i=10 %*) и первоначальных инвестиций (*I<sub>t</sub>*), вложенных в производство установок. Чистый денежный поток формируется как разница между экономией на эксплуатационных затратах и капитальными затратами.

**Таблица 2.** Показатели инвестиционной деятельности, тыс. р.

Показатели	Обозн.	Сборка, год		Эксплуатация, год		
		0	1	2	3	5
Инвестиции	<i>I<sub>t</sub></i>	252	-	-	-	-
Чистый денежный поток	<i>D<sub>t</sub></i>	-	-59	134	327	738
Чистый дисконтированный доход	<i>NPV</i>	-252	-54	111	246	458

Чистый дисконтированный доход, рассчитанный по (1), показывает, что на втором году эксплуатации затраты полностью себя окупают и начинается экономия средств.

$$NPV = \sum_{t=1}^3 \frac{D_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^3 I_t. \quad (1)$$

При условии финансирования разработанного проекта из местного бюджета представленная выше экономия является показателем бюджетной эффективности. При этом происходит экономия эксплуатационных затрат, связанных с выработкой электрической энергии и заменой дизельных установок когенерационными установками. За 5 лет совокупная экономия (*NPV*) в расчёте на 100 кВт установленной мощности составит до 878 тыс. р. при среднегодовой экономии 146 тыс. р. с учётом капитальных вложений. Социальная эффективность внедрения когенерационных установок достигается за счёт снижения себестоимости вырабатываемой продукции – тепловой и электрической энергии и как следствие снижения отпускной цены. Говоря о потенциальной эффективности проекта по замещению всего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области, можно констатировать, что экономия эксплуатационных затрат при суммарной установленной мощности в 50 тыс. кВт может достигать уровня 73 млн р./год.

Эксплуатационные затраты на когенерационные установки приведены исходя из цен 2013 г. Эксплуатационные затраты на ДЭС приведены исходя из стоимости дизельного топлива по состоянию на 2002 г. из источника [3]. Естественно, что затраты на дизельное топливо в 2013 г. были значительно выше, чем в 2002 г., соответственно можно рассчитывать на кратное увеличение экономии эксплуатационных затрат при переходе на выработку электрической энергии когенерационными установками суммарной установленной мощно-

стью 50 тыс. кВт для покрытия нужд изолированных районов Томской области.

Оценка коммерческой эффективности выполняется по методике [21], наиболее близко подходящей к тематике исследований, и включает в себя идентификацию технических, финансово-экономических, экологических и социальных рисков, что в целом позволяет определить вероятность наступления риска в целом. Технические риски определяются зависимостью использования технологии от качества энергоресурсов (низкосортное топливо), надёжностью и безопасностью внедряемой технологии низкотемпературной внутрицикловой конверсии, реальными объемами энергоресурсосбережения. Финансово-экономические риски определяются неустойчивостью объемов спроса, изменением в системе налогообложения, изменением штрафов по экологическим выбросам, ростом стоимости используемых низкосортных энергоресурсов. Экологические риски определяются величиной загрязнения окружающей среды при эксплуатации когенерационных установок, а также возможными последствиями от аварий, сопровождающихся вредными выбросами. Социальные риски определяются возможным ростом тарифов на производимую продукцию, отсутствием субсидий из государственного бюджета. Определение всех вышеперечисленных рисков позволило спрогнозировать величину совокупного риска (табл. 3) по внедрению когенерационных установок.

**Таблица 3.** Прогнозная величина совокупного риска

Наименование риска	Величина риска
Технические	0,07
Финансово-экономические	0,08
Экологические	0,12
Социальные	0,06
Совокупный риск	0,33

По результатам расчета видно, что вероятность наступления совокупного риска ниже среднего и ближе к критерию «скорее не наступит». Наибольшую величину представляют экологические риски, обусловленные важностью предотвращения наступления такого события. Технические риски обусловлены, прежде всего, надёжностью и безопасностью внедряемой технологии. Финансово-экономические риски в основном зависят от стоимости используемого сырья, а социальные риски всецело зависят от политики, проводимой местными властями.

Анализ чувствительности проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки проводится для оптимистического и пессимистического сценариев, связанных с изменением стоимости низкосортного топлива в диапазоне 0...300 р./т.н.т., и нормы дисконта (ставки доходности) 10...25 % в случае привлечения частных инвесторов. Таким образом, оптимистичный и пессимистичный сценарии характеризуются следующими показателями (табл. 4).



Таблица 4. Показатели сценариев

Сценарий	Предполагаемый диапазон изменения показателей	
	Цена топлива, р./т.н.т	Норма дисконта, %
Оптимистичный	0	10
Пессимистичный	300	25

При анализе чувствительности используется величина чистого дисконтированного дохода ( $NPV$ ), вычисленная для оптимистичного (878 тыс. р.) и пессимистичного (353 тыс. р.) сценариев в расчёте на 100 кВт установленной мощности за 5 лет.

Согласно расчётам по пессимистичному сценарию, на втором году эксплуатации экономия топливной составляющей в денежном выражении составляет 65 тыс. р. для когенерационной установки мощностью 100 кВт. Потенциальная эффективность проекта по пессимистичному сценарию для суммарной установленной мощности 50 тыс. кВт в виде экономии эксплуатационных затрат в среднем за 1 год составляет 35,3 млн р./год.

С учетом существующей неопределённости в виде двух сценариев развития проекта оценка его эффективности в целом осуществляется посредством определения ожидаемого интегрального эффекта  $\mathcal{E}_{ож}$ , зависящего от наибольшего  $\mathcal{E}_{max}$  и наименьшего  $\mathcal{E}_{min}$  интегральных эффектов ( $NPV$ ) по рассмотренным сценариям, с учётом норматива  $\lambda$  (согласно рекомендациям принято 0,3), отражающего предпочтения соответствующего хозяйствующего субъекта в условиях неопределённости:

$$\mathcal{E}_{ож} = \mathcal{E}_{max} \cdot \lambda + (1 - \lambda) \cdot \mathcal{E}_{min}$$

Значение ожидаемого интегрального эффекта от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки на территории Томской области в расчёте на 5 лет с учётом неопределённости составляет 255,25 млн

р. Таким образом, в условиях неопределённости реализация проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки представляется экономически целесообразной в случае привлечения инвестиций как из бюджетов различных уровней, так и частного капитала.

#### Выводы

1. Разработана новая конструкция когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения (заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2013143097 от 23.09.2013).
2. Капитальные затраты на производство когенерационных установок превосходят стоимость существующих ДЭС, однако низкие эксплуатационные затраты, определяемые стоимостью топлива, приводят к быстрой окупаемости затрат.
3. Бюджетная эффективность проекта по замещению действующего парка ДЭС Томской области когенерационными установками определяется экономией затрат на топливную составляющую в процессе выработки электроэнергии, которая может достигать уровня 73 млн р./год.
4. Ожидаемый интегральный эффект от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области в течение 5 лет находится на уровне 255 млн р., что свидетельствует об экономической целесообразности тиражирования когенерационных установок.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», ГК № 14.516.11.0078 от 27 июня 2013 г.), гранта РФФИ № 13–08–98070 и Госзадания на НИР № 2069 в 2014 году.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р // Российская газета, 25.01.2011.
2. Постановление Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года» // Интерактивная коммуникационная площадка для государственных служащих «ГосБук» [2014–2014]. Дата обновления: 01.02.2014. URL: <http://www.gosbook.ru/node/31231> (дата обращения: 20.09.2013 г.).
3. Сергеев М.Н. Электроснабжение потребителей изолированных районов Томской области: состояние и перспектива / Энергоснабжение и энергетическая безопасность регионов России. III Всероссийское совещание: сб. докладов. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 2002. – С. 30–38.
4. General Electric займется строительством объектов малой генерации для промышленных предприятий // Журнал Металлоснабжение и сбыт. 1995–2013. URL: <http://www.metallinfo.ru/ru/news/64626> (дата обращения: 20.09.2013).
5. Новосибирская область проведет модернизацию объектов ЖКХ с использованием технологий когенерации // Интернет-портал сообщества ТЭК. 2007–2013. URL: <http://energyland.info/news-show-tek-teplo-102014> (дата обращения: 21.06.2013).
6. Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределённая энергетика» // Интернет-портал ЗАО «Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике» URL: [http://www.eapbe.ru/distributed\\_energy/memo\\_TP\\_SDE.php](http://www.eapbe.ru/distributed_energy/memo_TP_SDE.php) (дата обращения: 24.07.2013).
7. Анализ эффективности современных промышленных технологий газификации угля / А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин, А.В. Попов, Т.Ф. Богатова // Энергетик. – 2012. – № 10. – С. 22–25.
8. Перспективы применения гибридных энергоустановок на основе твёрдо-оксидных топливных элементов с внутрициклового газификацией углей / Д.С. Безносова, Д.Г. Григоров, Д.А. Лялин, А.В. Туркин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9. – С. 63–66.
9. Молодков В.В., Исамухамедов Я.Ш., Баринов В.А. Состояние и перспективы развития в России нетрадиционной возобновляемой и децентрализованной энергетике // Энергетик. – 2012. – № 4. – С. 48–50.
10. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов (обзор) / Д.О. Дуников, В.И. Борзенко, С.П. Малышенко, Д.В. Блинов, А.Н. Казаков // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 48–57.
11. Способ получения газа из твёрдого топлива: пат. 2321617 Рос. Федерация МПК C10J3/54; заявл. 18.12.2006; опубл. 10.04.2008. – 7 с.



12. Способ получения горючего газа, обогащённого водородом: пат. 2462503 Рос. Федерация МПК C10J3/02; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.09.2012. – 6 с.
13. Исследование процесса генерации газа в автономных энергетических установках / А.С. Заворин, А.В. Казаков, А.А. Макеев и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 1. – С. 74–78.
14. Способ получения топливных брикетов из низкосортного топлива: пат. 2458974 Рос. Федерация МПК C10L5/14, C10L5/28; заявл. 08.06.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 4. – 7 с.
15. Способ изготовления топливных брикетов из биомассы: пат. 2484125 Рос. Федерация МПК C10L5/44; C10L5/14; C10L5/26; C10F7/06; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.06.2013. – 7 с.
16. Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 18–22.
17. Когенерационная энергоустановка с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья: заявка на пат. 2013143097 Рос. Федерация МПК C10J3/00, C10J3/20, H01M8/06; заявл. 23.09.2013.
18. Модель когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения (методическое пособие по работе модели) / А.В. Казаков, А.С. Заворин, Р.Б. Табакаев, П.Ю. Новосельцев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 82 с.
19. Проект модуля блочной когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения: монография / А.В. Казаков, А.С. Заворин, Р.Б. Табакаев, П.Ю. Новосельцев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 191 с.
20. Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2002. – 158 с.
21. Зубова М.В. Инструменты оценки эффективности инвестиций в инновационные энерготехнологии: дис. ... канд. экон. наук. – Красноярск: СФУ, 2007. – 245 с.

Поступила 26.09.2013 г.

UDC 62-665.9

## THE COGENERATION POWER PLANT WITH A FUEL CELL BASED ON INTRACYCLIC CONVERSION OF ORGANIC MATERIAL FOR OFF-LINE POWER SUPPLY

**Aleksandr V. Kazakov,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

**Aleksandr S. Zavorin,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Pavel Yu. Novoseltsev,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: pavel2906@rambler.ru

**Roman B. Tabakaev,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

*The development of power plants for decentralized energy supply consumers is the current problem of research and it is confirmed by modern vectors of small power development. The aim of the work is the development and feasibility study of reclamation of innovative energy technologies for applying low-grade fuels in small power engineering in cogeneration plants with a fuel cell. The authors have used the experimental and theoretical research methods and have constructed the experimental model of a cogeneration power plant that allows you to check the function and to determine the characteristics of technical solutions cogeneration power plant. The experimental model was used for carrying out the researches; the calculation of the power plant construction is based on the results of the researches. The authors carried out technical and economic evaluation of the power plant by the design results.*

**The results of the research:** the power plant construction was designed and feasibility study of its implementation advisability was proposed.

**Conclusions:** the new design of the cogeneration power plant was developed with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for independent power supply; capital costs on production of cogeneration plants exceed the cost of existing diesel power plant, but low operating costs, determined by fuel cost result in rapid payback. Budget effectiveness of the project for replacing the existing diesel power plant park by cogeneration plants is determined by fuel component savings when generating electricity, which can reach the level of 73 million rubles per year; the expected integral effect of the project for replacing the existing diesel power plant park by cogeneration plants in Tomsk region for 5 years is at the level of 255 million rubles, indicating the economic feasibility of replicating cogeneration plants.

### Key words:

Cogeneration power plant, fuel cells, intracyclic conversion, organic material, off-line power supply.

## REFERENCES

- Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 13.11.2009 g. № 1715-r [Government Directive]. *Rossiyskaya gazeta*, 25.01.2011.
- Energeticheskaya strategiya Tomskoy oblasti na period do 2020 goda* [Energy Strategy of Tomsk region until 2020]. Available at: <http://www.gosbook.ru/node/31231> (accessed 20 September 2013).
- Sergeev M.N. Elektrosnabzhenie potrebiteley izolirovannykh rayonov Tomskoy oblasti: sostoyanie i perspektiva [Electricity consumers in isolated areas of Tomsk region: state and prospects]. *Trudy III Vserossiyskogo soveshchaniya. Energosnabzhenie i energeticheskaya bezopasnost regionov Rossii* [Proc. 3<sup>rd</sup> Russia meeting. Energy supply and energy security of Russian regions]. Tomsk, 2002, pp. 30–38.
- General Electric zametsya stroitelstvom obektov maloy generatsii dlya promyshlennykh predpriyatiy* [General Electric will build small generation facilities for industrial enterprises]. Available at: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/64626> (accessed 24 July 2013).
- Novosibirskaya oblast provedet modernizatsiyu obektov ZHKKH s ispolzovaniem tekhnologiy kogeneratsii* [Novosibirsk region will upgrade housing and communal services using cogeneration technologies]. Available at: <http://energyland.info/news-show-tek-teplo-102014> (accessed 21 June 2013).
- Memorandum o sozdanii i deyatelnosti tekhnologicheskoy platformy «Malaya raspredelennaya energetika»* [Memorandum on the establishment and operation of the technological platform «Small distributed power»]. Available at: [http://www.eapbe.ru/distributed\\_energy/memo\\_TP\\_SDE.php](http://www.eapbe.ru/distributed_energy/memo_TP_SDE.php) (accessed 24 July 2013).
- Ryzhkov A.F., Silin V.E., Popov A.V., Bogatova T.F. Analiz effektivnosti sovremennykh promyshlennykh tekhnologiy gazifikatsii uglya [Analysis of the effectiveness of modern industrial coal gasification technology]. *Energetik*, 2012, no. 10, pp. 22–25.
- Beznosova D.S., Grigoryuk D.G., Lyalin D.A., Turkin A.V. Perspektivy primeneniya gibridnykh energoustanovok na osnove tverdo-oksidnykh toplivnykh elementov s vnutritsiklovoy gazifikatsiyey ugley [Prospects of application of hybrid power plants based on solid oxide fuel cells with gasification of coal]. *Thermal Engineering*, 2011, no. 9, pp. 63–66.
- Molodyuk V.V., Isamukhamedov Ya.Sh., Barinov V.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya v Rossii netraditsionnoy vozobnovlyemoy i detsentralizovannoy energetiki [Status and prospects of Russia's non-traditional renewable and decentralized energy]. *Energetik*, 2012, no. 4, pp. 48–50.
- Dunikov D.O., Borzenko V.I., Malysenko S.P., Blinov D.V., Kazakov A.N. Perspektivnye tekhnologii ispolzovaniya biovodoroda v energoustanovkakh na baze toplivnykh elementov (obzor) [Biohydrogen promising technologies in power plants based on fuel cells (review)]. *Teplotenergetika – Thermal Engineering*, 2013, no. 3, pp. 48–57.
- Zavorin A.S., Makeev A.A., Kazakov A.V. *Sposob polucheniya gaza iz tverdogo topliva* [A method of producing gas from solid fuel]. Patent RF, no. 2321617, 2008.
- Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob polucheniya goryuchego gaza, obogashchennogo vodorodom* [A method for producing a fuel gas rich in hydrogen]. Patent RF, no. 2462503, 2012.
- Zavorin A.S., Kazakov A.V., Makeev A.A. Issledovanie protsessa generatsii gaza v avtonomnykh energeticheskikh ustanovkakh [Investigation of the process of gas generation in autonomous power plants]. *Teplotenergetika – Thermal Engineering*, 2010, no. 1, pp. 74–78.
- Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob polucheniya toplivnykh briketov iz nizkosortnogo topliva* [A method for producing fuel pellets of a low-consumption]. Patent RF, no. 2458974, 2012.
- Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob izgotovleniya toplivnykh briketov iz biomassy* [A method of manufacturing fuel pellets from biomass]. Patent RF, no. 2484125, 2013.
- Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. Eksperimentalnye predposylki k tekhnologii proizvodstva toplivnykh briketov iz torfa [Experimental prerequisites to producing fuel briquettes from peat]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 18–22.
- Kogeneratsionnaya energoustanovka s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syr'ya* [Cogeneration power plant with a fuel cell based on organic raw conversion intracyclic]. Zayavka na patent RF, no. 2013143097, 2013.
- Kazakov A.V., Zavorin A.S., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Yu. *Model kogeneratsionnoy energoustanovki s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syr'ya dlya avtonomnogo energoobespecheniya (metodicheskoe posobie po rabote modeli)* [Model of cogeneration power plant with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for autonomous power supply (handbook on model operation)]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 82 p.
- Kazakov A.V., Zavorin A.S., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Yu. *Proekt modulya blochnoy kogeneratsionnoy energoustanovki s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syr'ya dlya avtonomnogo energoobespecheniya: monografiya* [Project of a module of block cogeneration power plant with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for autonomous power supply: Monograph]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 191 p.
- Kazakov A.V. *Termicheskaya konversiya nizkosortnykh topliv primenitelno k gazogeneriruyushchim ustanovkam. Kand. Diss.* [Thermal conversion of low-grade fuels in relation to gas generating devices. Cand. diss.]. Tomsk, 2002. 158 p.
- Zubova M.V. *Instrumenty otsenki effektivnosti investitsiy v innovatsionnye energotekhnologii. Kand. Diss.* [Tools for assessment of efficiency of investments in innovative energy technologies. Cand. diss.]. Krasnoyarsk, 2007. 245 p.

# Электроэнергетика

УДК 628.9.03:537.533.79

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКЛЮЧЕВОГО ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ ДЛЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СВЕТОДИОДОВ

**Гинтинг Рутта,**

студент кафедры электропривода и электрооборудования  
Энергетического института ТПУ, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30;  
консультант по энергетике отдела Высшей школы, Индонезия, 15318, БСД,  
Уортел Е6/14. E-mail: rutta\_ginting@ymail.com

**Иванов Александр Валериевич,**

мл. науч. сотр. НИИ автоматики и электромеханики  
Томского университета систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ivanovnii@sibmail.com

**Семенов Сергей Михайлович,**

ст. преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования  
Энергетического института ТПУ, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: epeo@enin.tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения затрат электроэнергии на освещение, а именно снижение потерь в источнике питания.*

**Цель работы:** формулирование требований к источнику питания для светодиодов. Исследование современного высокоэффективного источника света на основе светодиодных элементов, отвечающего стандартам по техническим и энергетическим показателям: коэффициенту полезного действия, точности стабилизации тока, коэффициенту пульсаций выходного напряжения и коэффициенту мощности.

**Методы исследования:** Обзор литературных и патентных источников по тематике, сравнительный анализ имеющихся данных, испытание опытного образца и имитационное моделирование в программной среде OrCAD.

**Результаты:** Предложен вариант двухключевого обратноходового преобразователя для источника питания осветительных установок с гальванической развязкой и составлена его компьютерная модель. Результаты показывают, что данный преобразователь соответствует требованиям по эффективности, коэффициенту мощности, надежности.

**Ключевые слова:**

Светодиод, источник питания, источник света, драйвер, двухключевой обратноходовой преобразователь.

Освещение является важным аспектом потребления энергии. В настоящее время его доля составляет 25 % от общего числа вырабатываемой электрической энергии [1]. Естественно, что снижение затрат на ее потребление является одной из важнейших задач. Новые источники света должны быть высокоэффективными, энергосберегающими и экологически чистыми [2]. Наиболее полно соответствует этим показателям источник напряжения на основе светодиодов. Источники света на основе светодиодов заняли лидирующие позиции на рынке для таких применений, как уличное освещение, подсветка ЖК-панелей и пр. [3].

Светодиод (СД, СИД, LED англ. *Light-emitting diode*) является низковольтным потребителем постоян-

ного тока. Кроме того, для него требуется ограничение величины прямого тока. Следовательно, для питания светодиода от сети переменного тока необходим специальный источник питания (драйвер) [4].

Светодиодный драйвер представляет собой электронное устройство, которое контролирует мощность одного светодиода или их последовательно соединенных линеек. Также драйверы обеспечивают стабилизацию мощности при изменении параметров нагрузки, например температуры [5].

Как известно, светодиоды представляют собой полупроводниковую структуру со свето-излучающим переходом и используются для работы с низковольтным источником постоянного тока [6]. Это обеспечивает светодиодам легкость адаптации к

различным применениям, большой срок службы и безопасность при использовании [5]. Светодиоды имеют полярность, следовательно, ток может протекать только в одном направлении. Малые величины тока и напряжения приводят к недостаточному световому потоку, с другой стороны, слишком большое напряжение и ток могут повредить полупроводниковую структуру.

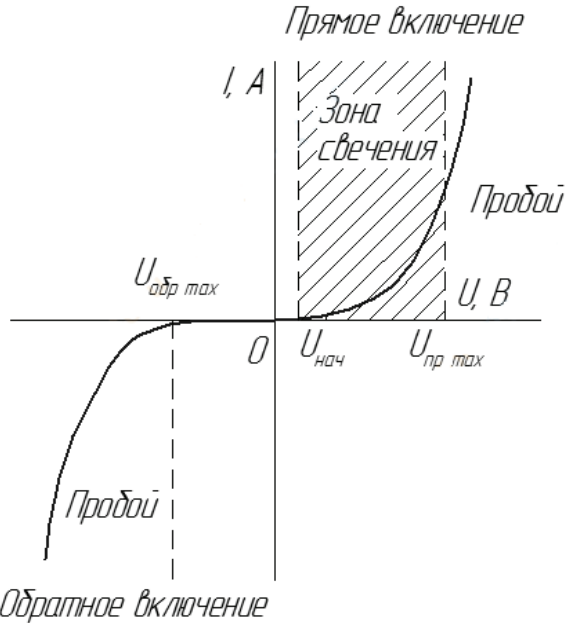


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика светодиода

Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) светодиода приведена на рис. 1. Видно, что небольшое изменение прямого напряжения создаст непропорционально большое изменение прямого тока. Кроме того, величина прямого падения напряжения, необходимого для достижения номинальной световой отдачи, зависит от многих факторов, таких как конструкция, температура и пр.

При питании светодиодов от регулируемого источника постоянного напряжения в первую очередь должны быть решены проблемы непостоянства светового потока и снижения срока службы. Таким образом, для осветительных приборов обычно рекомендуют использовать источник питания со стабилизацией выходного тока [6].

На рис. 2 изображена типовая ВАХ источника питания для светодиодного светильника. «Область постоянного тока» для каждого конкретного случая может отличаться из-за различных вариантов схем соединения светодиодов [7].

С учетом вышеизложенного, а также из-за особенностей осветительных сетей и нормативов по освещенности можно сформулировать следующие требования к источнику питания для светодиодов промышленного и уличного освещения: напряжение питания – от 185 до 245 В; выходная мощность – от 100 до 200 Вт; выходной ток – 0,35...2 А; выходное напряжение от 100 до 200 В; коэффициент пульсаций выходного напряжения – не более 2 %; КПД – не менее 80 %; коэффициент мощности – не менее 0,95; точность стабилизации тока –  $\pm 2\%$ ; рабочий диапазон температур – от  $-40$  до  $+50$  °С [8].

Светодиодные драйверы в основном бывают двух видов: AC/DC и DC/DC. Первый является наиболее распространенным и используются там, где требуется регулировка яркости. Второй тип применяется в цепях постоянного тока при широком диапазоне входного напряжения.

AC/DC преобразователи электрической энергии можно условно разделить на изолированные и неизолированные топологии, выбор варианта зависит от конкретных требований (габариты, эффективность, коэффициент мощности, регулируемый ток). Также проблема защиты от перенапряжений в переходных процессах для светодиодной нагрузки даже более критична, чем для некоторых других видов нагрузки [9, 10].

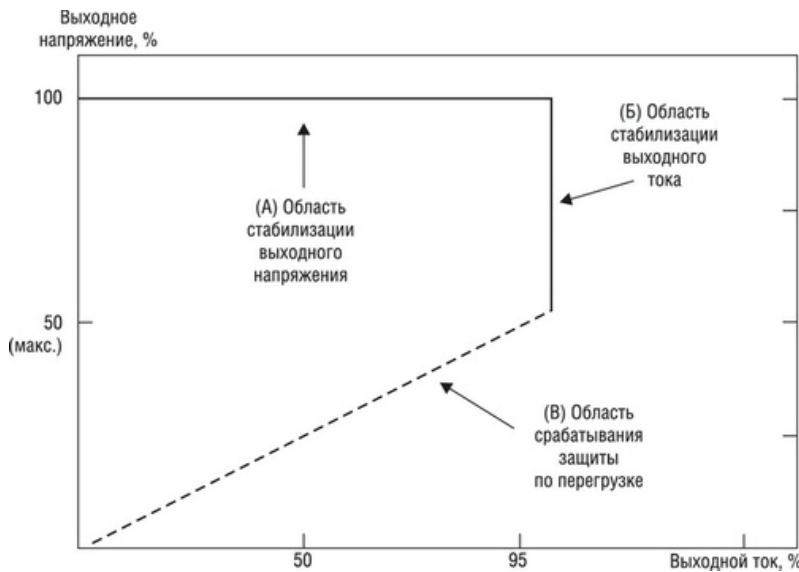


Рис. 2. Типовая вольт-амперная характеристика источника питания для светодиодов



В неизолированных топологиях нет трансформатора, их схема проще и состоит из меньшего количества компонентов. Эти источники питания широко применяются для создания маломощных ламп и светильников. Однако в ряде случаев необходимо обеспечить гальваническую развязку светильника от сети для выполнения требований безопасности, ведь, как правило, светодиоды имеют контакт с теплоотводом. Теплоотвод является обязательной частью светильника, так как чрезмерная температура приводит к потере эффективности светодиодов, может вызвать изменение цвета и даже стать причиной возгорания. Также неизолированные схемы более чувствительны к перенапряжениям в сети. В качестве примера неизолированных источников можно привести повышающие (boost) и понижающие (buck) непосредственные преобразователи постоянного тока [11].

В изолированных схемах присутствует трансформатор, который обеспечивает гальваническую развязку между первичной сетью и цепью постоянного тока. Такое решение удовлетворяет требованиям безопасности, но также должно удовлетворять запросам по стоимости, габаритам и потерям, обусловленным индуктивностью рассеяния и более низким использованием окна сердечника. Также важной задачей является коррекция коэффициента мощности (*англ. PFC Power factor correction*). Несмотря на существенные недостатки, применение этой схемы может уменьшить количество, размер и стоимость защитных элементов, необходимых во вторичной цепи трансформатора. В качестве примера изолированных схем можно привести резонансный и обратногоходовой преобразователи (*англ. flyback*).

При мощности менее 100 Вт обратногоходовой преобразователь является наиболее подходящим решением. При этом емкость накопительного конденсатора на вторичной стороне схемы является небольшой [12].

Преимущество обратногоходового преобразователя:

- может применяться с комбинацией любого количества светодиодов, за счет изменения коэффициента трансформации;
- обеспечивает изоляцию и функционирует при большой разности входного и выходного напряжений;
- позволяет использовать ряд промышленно изготавливаемых трансформаторов.

Недостатки обратногоходового преобразователя:

- существует проблема с электромагнитной совместимостью;
- не оптимальные масса-габаритные показатели;
- требуется дополнительная демпфирующая цепь из-за наличия индуктивности рассеяния трансформатора, что приводит к дополнительным потерям.

Основные требования к источникам питания светодиодов – это высокие надежность и эффективность, коррекция коэффициента мощности и в не-

которых случаях, гальваническая развязка. Эти топологии могут быть классифицированы в соответствии с числом ступеней преобразования от одной до трёх.

Одноступенчатые схемы подразумевают низкую стоимость и только одно преобразование энергии. Тем не менее, это также означает, что все задачи должны быть решены за одно преобразование, что обычно приводит к неоптимальному варианту решения. Кроме того, корректор коэффициента мощности без электролитических конденсаторов большой емкости будет иметь высокие пульсации выходного напряжения. Из-за особенностей светодиодов даже незначительные пульсации напряжения приводят к большим пульсациям тока и, следовательно, к мерцанию. Одноступенчатые схемы используются в небольших, чаще всего декоративных светильниках, где необходимы минимальные габариты.

В двухступенчатых источниках первая ступень – это корректор коэффициента мощности, а в качестве второй ступени используется преобразователь, который устраняет низкочастотные пульсации напряжения на выходе корректора коэффициента мощности и регулирует ток через светодиоды.

В трехступенчатой топологии каждый преобразователь оптимизирован только для одной задачи: коррекции коэффициента мощности, гальванической развязки и стабилизации тока в светодиодах. Таким образом, несмотря на три преобразования энергии, эффективность все еще может быть достаточно высокой за счет оптимизации каждой ступени. Однако такой подход имеет смысл только, когда нет ограничений по стоимости и габаритам.

Для питания мощных светильников наиболее распространенными являются двухзвенные варианты источников. В них первая ступень – это, как правило, корректор коэффициента мощности повышающего типа, а вторая ступень – преобразователь, обеспечивающий гальваническую развязку и стабилизацию тока светодиодов [13].

Рассмотрим двухключевой обратногоходовой преобразователь в качестве второй ступени источника питания светодиодов, как наиболее подходящий из вышеперечисленных вариантов. Впервые такая схема была описана в материалах фирмы Philips [13]. Основные преимущества данной схемы следующие:

- напряжение на ключах не превышает напряжение питания;
- отсутствуют сквозные токи, как и в двухтактных преобразователях;
- простота системы управления;
- нет необходимости в демпфирующих цепях;
- отсутствие индуктивности в выходном фильтре по сравнению с прямым преобразователем;
- высокий показатель надежности.

Источник питания по схеме двухключевого обратногоходового преобразователя и его диаграммы токов и напряжений в установившемся режиме приведены на рис. 3.

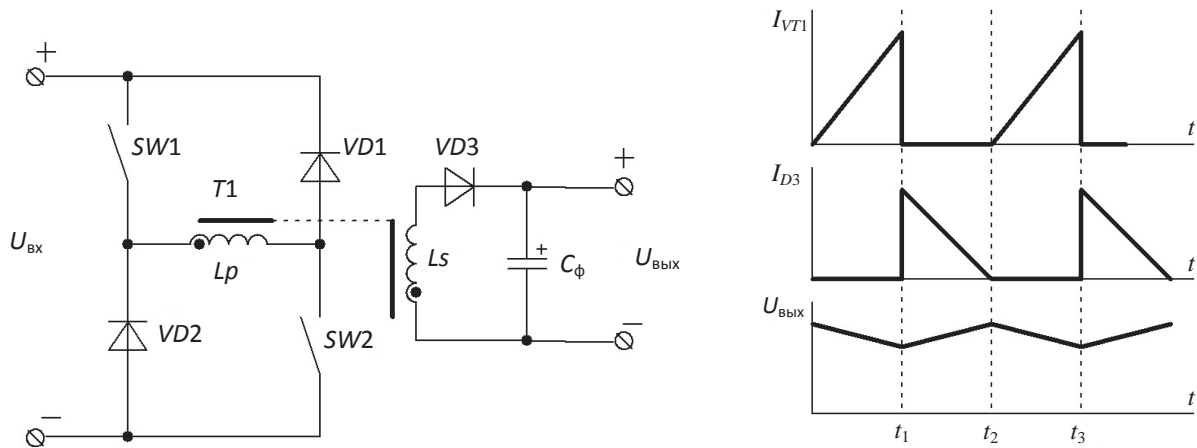
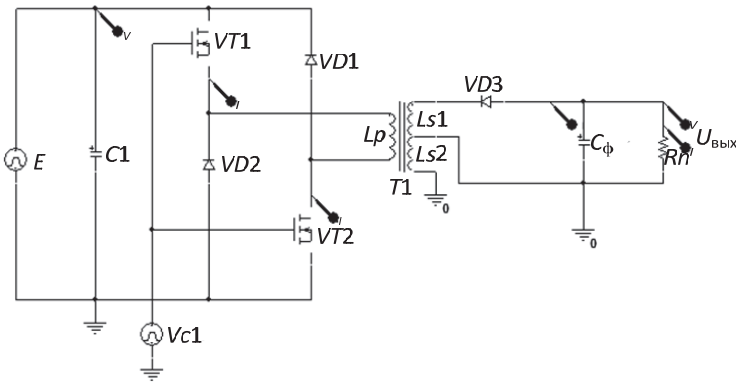
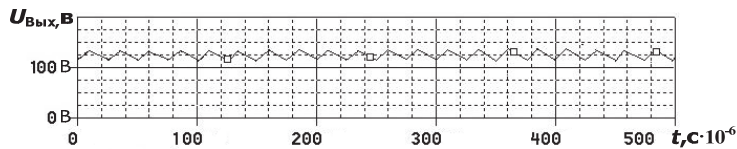
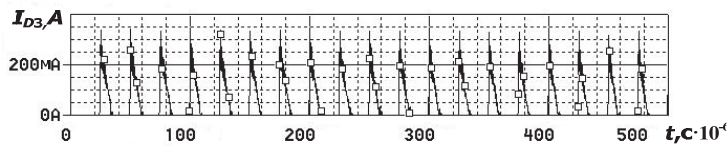
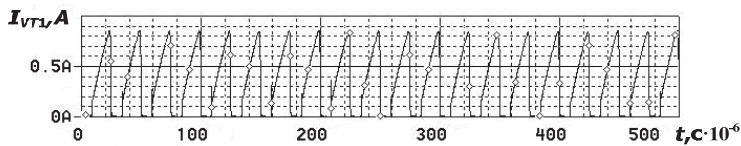


Рис. 3. Схема двухключевого обратного преобразователя и его диаграммы токов и напряжений



а

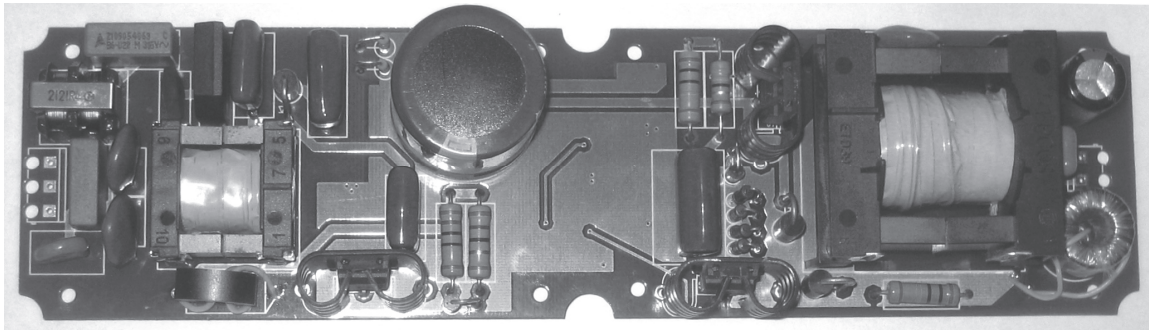


б

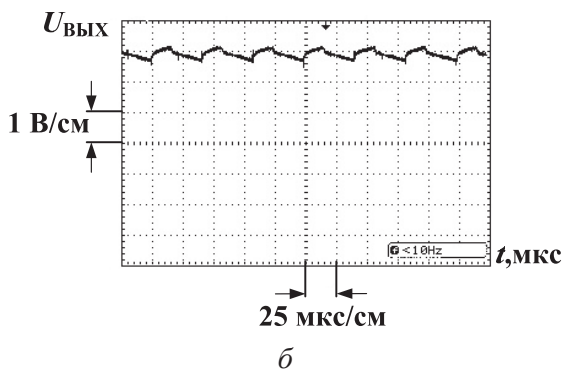
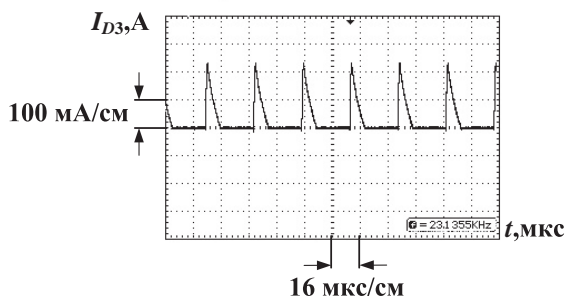
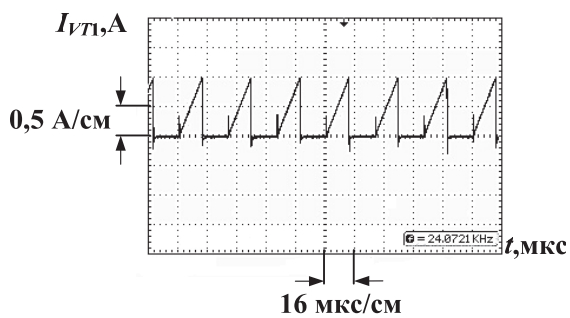
Рис. 4. Модель силовой части светодиодного драйвера в САПР OrCAD: а) схема; б) временные диаграммы токов и напряжений

Данный тип преобразователя работает как обычный обратный преобразователь, но с небольшими отличиями. В период с  $0-t_1$  ключи SW1 и SW2 замкнуты и ток протекает через первичную обмотку W1, диод VD3 в этот период закрыт. Затем в течение периода  $t_1-t_2$  ключи SW1 и SW2 закрыты, диод VD3 включен и ток протекает через вторичную обмотку W2. Трансформатор T1 накапливает энергию в течение промежутка

$0-t_1$  и отдает её в нагрузку в течение периода  $t_1-t_2$ . Стабильность выходного напряжения поддерживается за счет конденсатора  $C_{\text{ВЫХ}}$ . В обычном обратном преобразователе напряжение на ключе превышает напряжение питания, а в данном варианте, если напряжение на первичной обмотке становится больше, чем напряжение питания, диоды VD1 и VD2 открываются и отдают избыточную энергию обратно в первичный источник.



а



б

Рис. 5. Опытный образец драйвера: а) внешний вид; б) осциллограммы его токов и напряжений

С помощью имитационного моделирования, в программной среде *OrCAD*, была рассмотрена работа исследуемой схемы (рис. 3). Более подробное описание моделирования этой схемы можно найти в [8]. Результаты моделирования приведены на рис. 4, содержащем схему, диаграммы токов

(транзистора *VT2*, диода *VD3*) и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  в начале переходного процесса (снизу-вверх).

В соответствии с принципиальной схемой преобразователя, изображенной на рис. 3, изготовлен опытный образец драйвера мощностью 150 Вт и массогабаритными показателями: масса – 295 г, длина – 220 мм, ширина – 60 мм, высота 35 мм и проведены результаты экспериментального исследования (рис. 5). На рис. 5, б изображены осциллограммы токов и напряжений, полученные опытным путем с помощью цифрового осциллографа (*LeCroy Wave Ace*). Испытания показали, что драйвер обладает следующими параметрами: напряжение питания – от 140 до 245 В; выходная мощность – от 115 до 195 Вт; выходной ток – 1,05 А; выходное напряжение – от 108 до 190 В; КПД – 0,86; коэффициент мощности – 0,98 (при использовании корректора коэффициента мощности); точность стабилизации тока  $\pm 2\%$  при изменении нагрузки в диапазоне 100...180 Ом и  $\pm 0,1\%$  при изменении напряжения питания в диапазоне 140...245 В; рабочий диапазон температур ( $-35...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В опытном образце частота работы инвертора 24 кГц, частота работы корректора коэффициента мощности 100 кГц [8].

#### Выводы

Результаты моделирования показали, что теоретические и экспериментальные формы токов и напряжений полностью совпадают, пульсации выходного напряжения не превышают заданной величины (2%), нежелательные перенапряжения отсутствуют. Таким образом, рассматриваемый двухключевой обратноходовой преобразователь может быть использован в качестве второй ступени в источнике питания для мощных светодиодов, обеспечивая при этом все заданные требования. Разработанный драйвер может быть применен в составе светильников промышленного и бытового назначения в помещениях и на открытом воздухе, в том числе для уличного освещения. Планируется создание по данной схеме гаммы драйверов различной мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smart control of road-based LED fixtures for energy saving / A. Lay-Ekuakille, F. D'Aniello, F. Miduri, D. Leonardi, A. Trotta // Proc. IEEE Intell. Data Acquisition Adv. Comput. Syst. – Lecce, 2009. – P. 59–62.
2. Tsao J. Roadmap projects significant LED penetration of lighting market by 2010 // Laser Focus World Magazine. – 2003. – V. 39. – P. 11–14.
3. Evaluation of peripheral visual performance when using incandescent and LED miner cap lamps / J. Sammarco, M. Reyes, J. Bartels, S. Gallagher // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2009. – V. 45. – № 6. – P. 1923–1929.
4. DiLouie C. Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver // LEDs Magazine. URL: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2004/12/controlling-led-lighting-systems-introducing-the-led-driver.html> (дата обращения: 01.11.2013).
5. LED driver. Diodes Incorporated. URL: [http://www.diodes.com/content\\_glossary/led\\_driver/led\\_driver\\_menu.html](http://www.diodes.com/content_glossary/led_driver/led_driver_menu.html) (дата обращения: 01.11.2013).
6. Cooper J. Driving LED lamps – some simple design guidelines // LEDs Magazine. – 2007. – V. 4. – P. 26–28.
7. LED Power Supply Technical Manual: ISO-9001 Certified Manufacture. Mean Well Enterprises Co., LTD, 2009.
8. Исследование и разработка элементов и узлов системы управления светодиодным источником света с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками / А.В. Иванов, А.В. Фёдоров, Т.Н. Зайченко, И.В. Целебровский // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 3. – С. 71–77.
9. Patel U. Non-Isolated Driver Protection for LED Lamps. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013. – P. 3–9.
10. LED Lighting Solution. ON Semiconductor Publ., March 2013. 48 p.
11. Patel U. Focus LED Design on Driver Topology, Circuit Protection. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013. – P. 32–36.
12. Liu Y., Yang J. The Topologies of White LED Lamps Power Drivers. Power Electronics Systems and Applications, 2009PE-SA2009. 3<sup>rd</sup> International Conference. – Guangzhou, 2009. – P. 1–6.
13. Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of an LED driver for street lighting application / M. Arias, D. Lamar, F. Linera., D. Balocco, A. Diallo, J. Sebastián // IEEE Transactions on Power Electronics. – Gijon, March 2012. – V. 27. – P. 1608–1621.
14. Wolf G. Mains isolating switching-mode power supply // Philips Electronic Application Bulletin. – 1973. – V. 32. – № 1. – P. 18–21.

Поступила 04.11.2013 г.

UDC 628.9.03:537.533.79

## RESEARCH OF TWO-SWITCH FLYBACK CONVERTER AS A SECOND STAGE OF A LED DRIVER

**Rutta Ginting,**

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30;  
Energy division institute, Indonesia, 15318, BSD, Wortel E6/14.  
E-mail: [rutta\\_ginting@gmail.com](mailto:rutta_ginting@gmail.com)

**Aleksandr V. Ivanov,**

Research Institute of Electromechanics at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40.  
E-mail: [ivanovnii@sibmail.com](mailto:ivanovnii@sibmail.com)

**Sergey M. Semenov,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: [epeo@enin.tpu.ru](mailto:epeo@enin.tpu.ru)

*The urgency of the discussed issue is caused by the need to reduce electricity costs for lighting decreasing power losses in the power supply.*

**The main aim of the study** is to formulate basic requirements for LED driver; to analyze modern high-efficiency light sources based on LED lamp, to test two switch flyback converter for technical and energy performance: efficiency, accuracy of current regulation, output ripple voltage and power factor, energy.

**Methodology:** Literature review on topics, such as comparative data analysis using prototype testing and computer modeling using OrCad program.

**Results:** the authors have proposed a version of two switch flyback converter for lighting units with galvanic isolation and have constructed its computer model. The results demonstrate good working performance according to standard requirements for green energy device specification.

### Key words:

LED, power source, source of light, driver, two-switch flyback converter.



## REFERENCES

1. Lay-Ekuakille A., D'Aniello F., Miduri F., Leonardi D., Trotta A. Smart control of road-based LED fixtures for energy saving. *Proc. IEEE Intell. Data Acquisition Adv. Comput. Syst. Lecce, 2009*, pp. 59–62.
2. Tsao J. Roadmap projects significant LED penetration of lighting market by 2010. *Laser Focus World Magazine*, May 2003, vol. 39, pp. 11–14.
3. Sammarco J., Reyes M., Bartels J., Gallagher S. Evaluation of peripheral visual performance when using incandescent and LED miner cap lamps. *IEEE Trans. Ind. Appl. Nov. 2009*, vol. 45, no. 6, pp. 1923–1929.
4. DiLouie C. Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver. *LEDs Magazine*. Available at: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2004/12/controlling-led-lighting-systems-introducing-the-led-driver.html> (accessed 1 November 2013).
5. LED driver. *Diodes Incorporated*. Available at: [http://www.diodes.com/content\\_glossary/led\\_driver/led\\_driver\\_menu.html](http://www.diodes.com/content_glossary/led_driver/led_driver_menu.html) (accessed 1 November 2013).
6. Cooper J. Driving LED lamps – some simple design guidelines. *LEDs Magazine*. August 2007, vol. 4, pp. 26–28.
7. LED Power Supply Technical Manual: ISO-9001 Certificated Manufactur. Mean Well Enterprises Co., LTD, 2009.
8. Ivanov A.V., Fedorov A.V., Zaychenko T.N., Tselebrovskiy I.V. Issledovanie i razrabotka elementov i uzlov sistemy upravleniya svetodiodnym istochnikom sveta s uluchshennymi tekhnicheskimi i ekspluatatsionnymi kharakteristikami [Research and development of components and units control of Light-emitting diode light source with the improved technical and operational characteristics]. *Doklady Tomskovo universiteta system upravleniya i radioelektroniki*, 2011, no. 2 (24), P. 3, pp. 71–77.
9. Littelfuse, Inc. Non-Isolated Driver Protection for LED Lamps. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013, pp. 3–9.
10. LED Lighting Solution. ON Semiconductor Publ., March 2013. 48 p.
11. Patel U. Focus LED Design on Driver Topology, Circuit Protection. Littelfuse's LED Lighting Design Guide, 2013, pp. 32–36.
12. Liu Yu, Yang Jinming. The Topologies of White LED Lamps Power Drivers. *Power Electronics Systems and Applications, 2009PESA2009. 3<sup>rd</sup> International Conference*. Guangzhou, 2009, pp. 1–6.
13. Arias M., Lamar D., Linera F., Balocco D., Diallo A., Sebastián J. Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of an LED driver for street lighting application. *IEEE Transactions on Power*. Gijon, March 2012, vol. 27, pp. 1608–1621.
14. Wolf G. Mains isolating switching-mode power supply. *Philips Electronic Application Bulletin*, 1973, vol. 32, no. 1, pp. 18–21.

## МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Коротков Максим Федорович,**

аспирант кафедры «Электротехнические комплексы и системы»  
(Политехнического института) СФУ Россия, 660041, г. Красноярск,  
пр. Свободный, 79. E-mail: hamsterboo@mail.ru

**Пахомов Александр Николаевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы  
и системы» (Политехнического института) СФУ,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: pnalex@mail.ru

**Федоренко Александр Александрович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы  
и системы» (Политехнического института) СФУ,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: alfedor47@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью создания быстродействующих замкнутых систем асинхронного электропривода, находящих все большее применение в промышленности.

**Цель работы:** построение замкнутой системы преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения – асинхронный двигатель с модальным управлением.

**Методы исследования:** теоретические исследования выполнены с привлечением современной теории электропривода и методов теории автоматического управления. Теоретические исследования подтверждены модельным экспериментом.

**Результаты:** Описан способ формирования линейных уравнений состояния асинхронного двигателя с компенсацией перекрестных обратных связей по току с помощью технических средств и заданием определенного алгоритма функционирования замкнутой системы, обеспечивающего возможность расчета коэффициентов модального регулятора. Разработана модель асинхронного электропривода, учитывающая дискретные свойства преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Исследованы динамические режимы работы замкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель с модальным управлением в среде имитационного моделирования Simulink пакета MatLab.

**Выводы:** рассмотренная в работе методика построения системы асинхронного электропривода с модальным управлением позволяет существенно увеличить его быстродействие в динамических режимах работы.

**Ключевые слова:**

Модальный регулятор, асинхронный электропривод, векторная система, широтно-импульсная модуляция, математическая модель.

В настоящее время системы управления асинхронным электроприводом (АЭП) с преобразователем частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) строятся на принципах подчиненного регулирования, что не позволяет достичь предельного быстродействия [1–3]. Вопросы синтеза модальных регуляторов, как правило, рассматриваются на базе электроприводов постоянного тока [4–15], не смотря на сложившуюся тенденцию перехода на АЭП. Снабдив АЭП модальным регулятором, построенным на основе суммирования обратных связей по вектору состояния, можно обеспечить быстродействие в динамических режимах работы, близкое к предельному. Целью работы является определение структуры и параметров модальных регуляторов частотно управляемого АЭП и проверки эффективности принятых при этом решений методами имитационного моделирования в среде *MatLab*.

На рис. 1 приведена функциональная схема ПЧ с АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

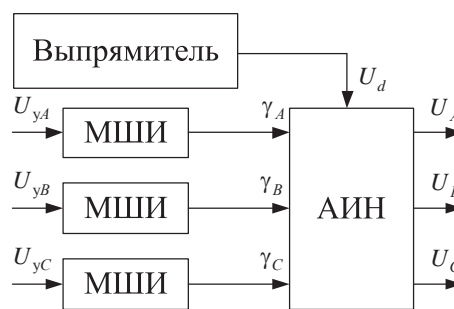


Рис. 1. Функциональная схема ПЧ с АИН с ШИМ

Модулятор широтно-импульсный (МШИ)  $i$ -й фазы ( $i \in \{A, B, C\}$ ) ПЧ по сигналу управления  $U_{yi}$  формирует скважность включения вентилей  $\gamma_i$  АИН с целью формирования из постоянного напряжения выпрямителя  $U_d$  трехфазного напряжения  $U_i$  требуемой частоты и амплитуды, подаваемого на статорную обмотку асинхронного двигателя (АД).

Функциональная схема МШИ приведена на рис. 2.

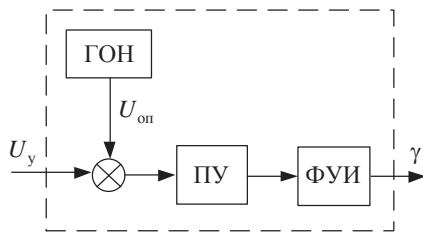


Рис. 2. Функциональная схема МШИ ПЧ

Модулятор широтно-импульсный включает в себя [16]:

- генератор опорного напряжения (ГОН), вырабатывающий напряжение пилообразной формы  $U_{оп}$ ;
- пороговое устройство (ПУ), выдающее сигнал минимального уровня (нулевой сигнал) при разнице опорного и напряжения управления  $(U_{оп} - U_y) > 0$  и сигнал максимального уровня (единичный сигнал) при  $(U_{оп} - U_y) < 0$ ;
- формирователь управляющих импульсов (ФУИ), преобразующий сигнал ПУ в соответствующие управляющие импульсы  $\gamma$  для силовых вентилей АИН.

Поскольку в ПЧ с АИН с ШИМ автономный инвертор формирует не только частоту, но и амплитуду выходного напряжения, влияние звена постоянного тока на динамические свойства системы при синтезе можно не учитывать. Допущения, принятые при математическом описании АИН как элемента системы автоматического управления:

- все вентили инвертора – идеальные ключи;
- время переключения вентилей равно нулю;
- влияние процессов коммутации на форму выходного напряжения АИН не учитывается.

Математическая модель АД в форме Куши в декартовой системе координат  $u-v$ , вращающейся с произвольной скоростью  $\omega_k$ , имеет вид [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{1u}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1u} - \frac{1}{T_e} i_{1u} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2u} + \\ &\quad + \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2v} + \omega_k i_{1v}; \\ \frac{di_{1v}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1v} - \frac{1}{T_e} i_{1v} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2v} - \\ &\quad - \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2u} - \omega_k i_{1u}; \\ \frac{d\Psi_{2u}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1u} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2u} + (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{2v}; \\ \frac{d\Psi_{2v}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1v} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2v} - (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{2u}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1v} \Psi_{2u} - \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1u} \Psi_{2v} - \frac{1}{J} M_C, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}, \Psi_{2u}, \Psi_{2v}$  – проекции на оси  $u$  и  $v$  декартовой системы координат результирующих векторов напряжения статора  $u_1$ , тока статора  $i_1$ , пото-

косцепления ротора  $\Psi_2$  соответственно;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $\omega_k$  – скорость вращения системы координат  $u-v$ ;  $M_C$  – момент статического сопротивления на валу двигателя;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $J$  – момент инерции механической части привода;  $T_e$  и  $R_e$  – эквивалентные электромагнитная постоянная времени и активное сопротивление цепи статора АД;  $R_2$  и  $T_2$  – активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени цепи ротора АД;  $k_2$  – коэффициент электромагнитной связи ротора АД. Выражения для расчета параметров двигателя можно найти в [17, 18].

Уравнения (1) справедливы при следующих допущениях [17, 18]:

- машина симметрична и имеет равномерный воздушный зазор;
- магнитопровод машины ненасыщен;
- магнитодвижущая сила обмоток имеет синусоидальное распределение по рабочему зазору;
- параметры двигателя имеют постоянное значение.

Уравнения динамики АД (1) носят выраженный нелинейный характер и в векторно-матричной форме имеют вид:

$$\dot{X} = F(X, G),$$

где  $X$  и  $G$  – векторы переменных состояния и входных воздействий:

$$X = \begin{pmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \\ \Psi_{2u} \\ \Psi_{2v} \\ \omega \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad G = \begin{pmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ \omega_k \\ M_C \end{pmatrix}.$$

Процедура синтеза модального регулятора предполагает линейность объекта управления. Линеаризация уравнений динамики (1) методом малых приращений путем разложения в ряд Тэйлора дает достаточно громоздкую структуру линеаризованных уравнений, которые справедливы только в окрестностях отклонений переменных состояния относительно центра разложения [19].

Поэтому в работе выполнена компенсация внутренних перекрестных связей по току внешними звеньями [20]. В результате в системе координат  $x-u$ , ориентированной по вектору потокоцепления ротора ( $\Psi_2 = \Psi_{2x}, \Psi_{2y} = 0$ ), математическая модель АД примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{1u}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1u} - \frac{1}{T_e} i_{1u} + \frac{k_2}{T_2 R_e T_e} \Psi_{2u}; \\ \frac{di_{1v}}{dt} &= \frac{1}{R_e T_e} u_{1v} - \frac{1}{T_e} i_{1v} - \frac{k_2 Z_p}{R_e T_e} \omega \Psi_{2u}; \\ \frac{d\Psi_{2u}}{dt} &= R_2 k_2 i_{1u} - \frac{1}{T_2} \Psi_{2u}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3Z_p k_2}{2J} i_{1v} \Psi_{2u} - \frac{1}{J} M_C. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Заметим, что скорость вращения координат x-y равна скорости вращения вектора потокосцепления ротора  $\omega_k = \omega_0$ , которая определяется значениями переменных состояния асинхронной машины на основании четвертого уравнения системы (1) и становится внутренней координатой.

Нелинейные компоненты второго и четвертого уравнений (2) с помощью технических средств нейтрализовать не удастся. Однако это можно сделать, обеспечить определенный алгоритм функционирования системы. Если обеспечить постоянство потокосцепления ротора в процессе регулирования скорости, то второе и четвертое уравнение (2) становятся линейными [20].

Синтез модальных регуляторов осуществляется для двух линейных подсистем – подсистемы стабилизации  $\Psi_2$  и подсистемы управления  $\omega$ . Матрицы динамики и входа уравнений состояния для первой подсистемы определяются первым и третьим уравнениями системы (2), в которых переменными состояниями являются  $\Psi_2$  и формирующий его ток  $i_{1x}$ :

$$A_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_3} & \frac{k_2}{T_2 R_3 T_3} \\ R_2 k_2 & -\frac{1}{T_2} \end{pmatrix} \text{ и } B_1 = \begin{pmatrix} k_n \\ R_3 T_3 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В уравнениях второй подсистемы (второе и четвертое уравнения системы (2)) переменными состояниями являются ток  $i_{1y}$  и скорость вращения ротора  $\omega$ , при этом предполагается постоянство потокосцепления  $\Psi_2$ , которое поддерживается подсистемой стабилизации  $\Psi_2$  на номинальном уровне. В результате получаются линейные уравнения состояния со следующими матрицами входа и выхода:

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_3} & -\frac{k_2 Z_p \Psi_{2н}}{R_3 T_3} \\ \frac{3Z_p k_2 \Psi_{2н}}{2J} & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B_2 = \begin{pmatrix} k_n \\ R_3 T_3 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В матрицах входа учтен коэффициент передачи ПЧ АИН с ШИМ  $k_n$ , который определяется отношением амплитуд основной гармоники выходных напряжений АИН и выходных сигналов преобразователя координат прямого тракта. Статический момент при синтезе регулятора принимается равным  $M_c = 0$ , но учитывается при моделировании системы.

Коэффициенты модальных регуляторов  $K_{11}$  и  $K_{12}$  подсистемы стабилизации  $\Psi_2$  и  $K_{21}$  и  $K_{22}$  подсистемы управления  $\omega$  рассчитаны по методике, приведенной в [20]. Замкнутая подсистема  $\Psi_2$  настраивается на модульный оптимум, а подсистема регулирования скорости вращения ротора АД – на биномиальную настройку [20]. Некомпенсируемая постоянная времени, определяемая инерционностью и временем чистого запаздывания МШИ, наличием фильтров в каналах регулирования и дискретностью АИН принята равной  $T_\mu = 3,5$  мс [21].

На рис. 3 приведена функциональная схема, полученная в результате синтеза замкнутой системы частотно-управляемого асинхронного электропривода.

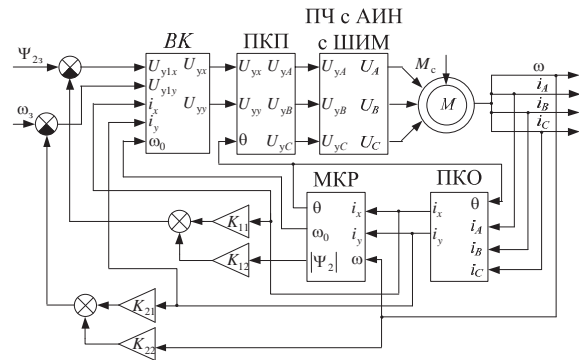


Рис. 3. Функциональная схема замкнутой системы асинхронного электропривода

На функциональной схеме приняты следующие обозначения:  $M$  – модель трехфазного АД (в работе принят двигатель серии RA100L4 с номинальными данными  $P_n = 3$  кВт,  $n_n = 1420$  об/мин);  $BK$  – блок компенсаций перекрестных связей по току статора (рассмотрен в [20]);  $\Psi_{2н}$  и  $\omega_0$  – заданные значения потокосцепления и скорости ротора АД;  $K_{ij}$  – коэффициенты обратных связей модального регулятора; ПКП, ПКО – преобразователи координат прямого и обратного каналов [17]; МКР – модель электромагнитного контура ротора АД.

Рассмотренная система векторного управления трехфазным асинхронным двигателем содержит модель косвенного определения модуля и скорости вращения вектора потокосцепления ротора. Структурная схема МКР показана на рис. 4. В основе этой структуры лежат уравнения роторной цепи АД, записанные в системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора [22]:

$$|\Psi_2| = \frac{L_m}{T_2 s + 1} i_{1x} \text{ и } \omega_0 = \frac{L_m i_{1y}}{T_2 |\Psi_2|} + Z_p \omega,$$

где  $s$  – оператор Лапласа;  $L_m$  – амплитудное значение взаимной индуктивности обмоток статора и ротора;  $|\Psi_2|$  – модуль вектора потокосцепления ротора;  $\theta$  – угловое положение вектора потокосцепления ротора относительно неподвижной в пространстве системы координат.

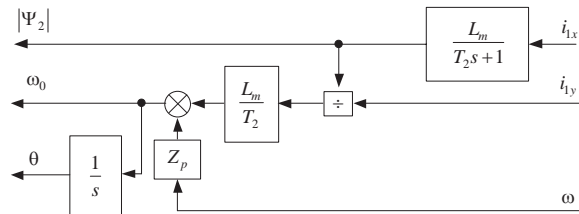


Рис. 4. Структурная схема МКР

С целью сравнительной оценки эффективности введения модальных регуляторов, правомерности принятых при расчете их параметров подходов и влияния дискретных свойств ПЧ с ШИМ на про-



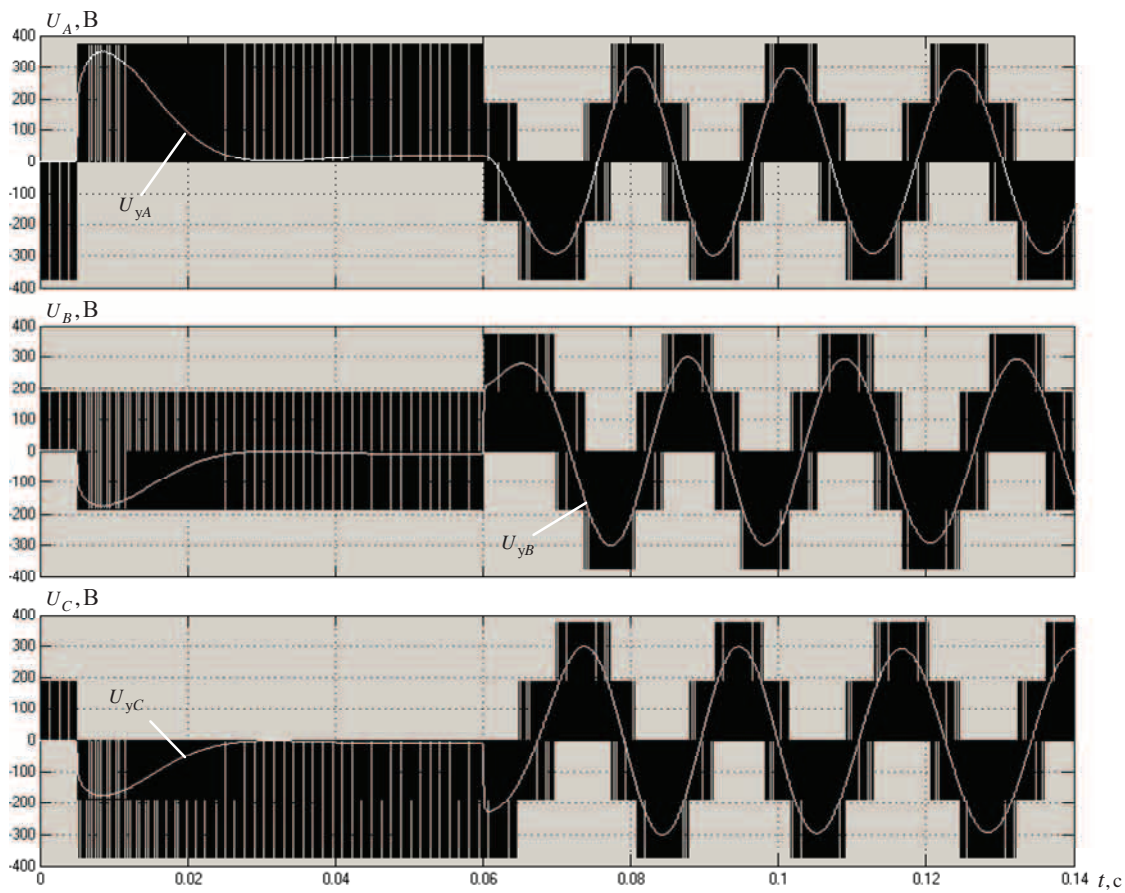


Рис. 5. Графики выходных напряжений ПЧ с ШИМ и сигналов управления

цессы в системах векторного частотного управления асинхронным электроприводом, снабженным модальным регулятором, разработана и реализована в пакете MatLab соответствующая функциональная схема рис. 3 имитационная модель.

Исследования, выполненные с помощью этой модели, частично представлены на рис. 5, 6.

На рис. 5 приведены графики выходных фазных напряжений автономного инвертора с ШИМ, наложенные на соответствующие графики фазных сигналов управления, поступающих на входы МШИ.

На рис. 6 представлены графики изменения выходных координат электропривода: модуля вектора потокосцепления ротора  $|\Psi_2|$ , скорости вращения ротора  $\omega$  и электромагнитного момента  $M$ .

Графики иллюстрируют три этапа (режима) работы системы автоматического управления:

- 1) формирование заданного значения модуля вектора потокосцепления ротора (этап возбуждения);
- 2) разгон двигателя до заданной скорости при постоянном потокосцеплении;
- 3) наброс статической нагрузки.

Как следует из графиков, качество динамических режимов в рассматриваемой системе достаточно близко к теоретически ожидаемому. При выбранном значении некомпенсированной постоянной времени  $T_\mu=3,5$  мс время переходного процесса

подсистемы стабилизации  $|\Psi_2|$  равно  $t_{\text{инв}\Psi_2}=15,2$  мс, а подсистемы регулирования  $\omega t_{\text{инв}\omega}=16,7$  мс. Теоретические значения при том же значении  $T_\mu$  при настройке на модульный оптимум  $t_{\text{инв}\Psi_2}=4,14T_\mu=14,49$  мс, а при биномиальной настройке  $t_{\text{инв}\omega}=4,74T_\mu=16,59$  мс. В системе с подчиненным регулированием переменных при тех же исходных данных быстродействие ниже, как минимум в два раза [21].

Существенные пульсации (дискретность) напряжений формируемых АИН, не смотря на высокое быстродействие, обеспечиваемое модальным регулятором, не приводят к сбоям в работе системы. Управляющие сигналы МШИ остаются гладкими и практически отсутствуют пульсации и в выходных переменных электропривода.

#### Выводы

1. Рассмотренная система частотного управления асинхронным электроприводом с модальным регулятором обладает примерно вдвое большим быстродействием относительно аналогичных систем с подчиненным управлением.
2. Рассмотренный подход к построению и выбору параметров модального регулятора позволяет обеспечить динамические характеристики системы близкие к теоретически ожидаемым.
3. Дискретные свойства преобразователя с ШИМ, при соответствующем выборе некомпенсирова-

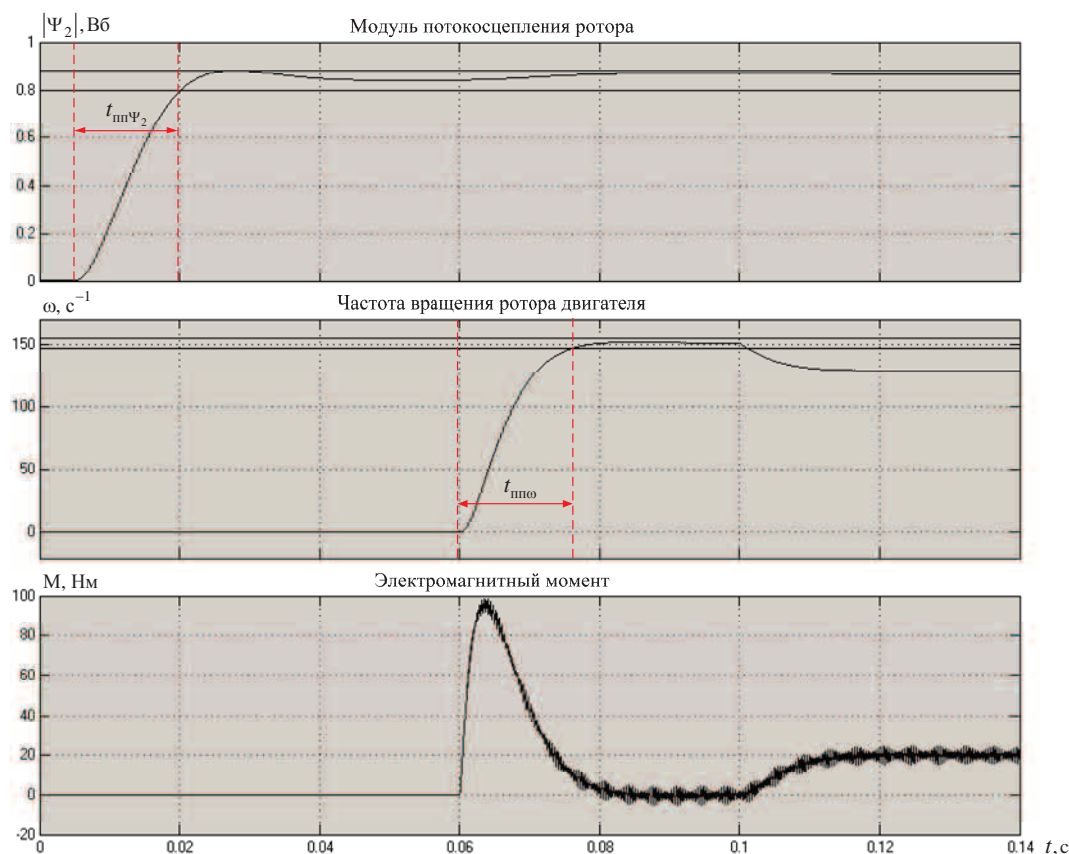


Рис. 6. Графики переходных процессов замкнутой системы ПЧ–АД

мой постоянной времени, не влияют на работоспособность системы и практически не влияют на характер изменения выходных переменных электропривода. Это подтверждает правомер-

ность представления ПЧ с ШИМ безынерционным линейным звеном и обосновывает возможность синтеза регуляторов методами теории непрерывных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.В., Козярук А.Е. Влияние структуры и алгоритмов САУ на энергетические и динамические показатели асинхронного привода горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 15–18.
2. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
3. Моторина Н.П., Винокуров Е.Б. О возможностях построения замкнутых систем управления частотными электроприводами // Вопросы современной науки и практики. – 2012. – № 3. – С. 61–64.
4. Паршуков А.Н. Методы синтеза модальных регуляторов. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2008. – 58 с.
5. Лозгачев Г.И., Безрядин М.М. Синтез модального регулятора с компенсацией внешнего возмущения для объекта с параметрической неопределенностью по критерию максимальной робастности // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 21. – С. 157–169.
6. Мирошниченко В.Г. Вопросы синтеза модальных регуляторов приводов станков. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2009. – 133 с.
7. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers / A.A. Anisimov, D.G. Kotov, S.V. Tararykin, V.V. Tyutikov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2011. – Т. 50. – № 5. – С. 698–713.
8. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.
9. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 3. – С. 9–15.
10. Копылов С.А., Шаров В.В. Синтез робастных модальных регуляторов для стабилизирующих систем автоматического управления // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 5–6. – С. 111–121.
11. Осина А.В., Ягодкина Т.В. Синтез систем модального управления с идентификаторами // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 2. – С. 109–114.
12. Лиходеров А.Д., Поршнягин Н.Н. Анализ использования модального регулирования на водонасосных станциях // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2011. – № 17. – С. 50–58.
13. Система управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 87–90.

14. Мазуров В.М., Фам Ван Нгуен. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 19–22.
15. Bhattacharyya S.P., Chapellat H., Keel L. Robust control: the parametric approach. Prentice-Hall Information & System Science Series. – N.J.: Prentice Hall, 1995. – 672 p.
16. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
18. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.
19. Федоренко А.А., Карагодин М.С. Линеаризованная модель асинхронного двигателя // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвузовский сборник. – Красноярск: КГТУ, 1992. – 160 с.
20. Коротков М.Ф., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Модальное управление электроприводом переменного тока // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 3. – С. 70–74.
21. Лазовский Н.Ф., Пахомов А.Н. Системы управления электроприводов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; политехн. ин-т, 2007. – 83 с.
22. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2008. – 298 с.

Поступила 02.11.2013 г.

UDC 621.318.562.5

## MODAL CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

**Maksim F. Korotkov,**

Siberian Federal University,

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: hamsterboo@mail.ru

**Aleksandr N. Pakhomov,**

Cand. Sc., Siberian Federal University

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: pnalex@mail.ru

**Aleksandr A. Fedorenko,**

Cand. Sc., Siberian Federal University

Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79. E-mail: alfedor47@mail.ru

**Relevance of the work** is caused by the need to develop high-speed closed-loop induction motor, finding wide application in industry.

**Objective:** To build a closed system frequency converter with pulse-width modulated output voltage – AC induction motor with modal control.

**Methods:** Theoretical studies were carried out with the involvement of the modern theory of electric drive and automatic control theory methods. Theoretical studies validated the model experiment.

**Results:** The paper describes the method of forming linear equations of state of the induction motor with compensation of cross-current feedback, through technical means and specifying an algorithm functioning of a closed-loop system which provides the ability to calculate the coefficients of the modal controller. The authors have developed the induction motor model which takes into account the properties of discrete frequency converter with pulse-width modulated output voltage. The dynamic modes of a closed system inverter – induction motor with modal control were studied in Simulink of MatLab.

**Conclusions:** The discussed methods for building a system of induction motor with modal control can significantly increase its performance under dynamic operating conditions.

### Key words:

Modal controller, asynchronous electric drive, vector system, pulse-width modulation, mathematical model.

### REFERENCES

1. Alekseev V.V., Kozyaruk A.E. Vliyaniye struktury i algoritmov SAU na energeticheskie i dinamicheskie pokazateli asinkhronnogo privoda gornogo oborudovaniya [Effect of structure and ACS algorithms on energy and dynamic performance of asynchronous drive mining equipment]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2013, no. 3, pp. 15–18.
2. Usoltsev A.A. *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors]. Saint Petersburg, SPbGU ITMO, 2006. 94 p.
3. Motorina N.P., Vinokurov E.B. O vozmozhnostyakh postroeniya zamknutykh sistem upravleniya chastotnymi elektroprivodami [The possibility of constructing a closed control system for frequency electric drives]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki*, 2012, no. 3, pp. 61–64.
4. Parshukov A.N. *Metody sinteza modalnykh regulyatorov* [Methods for modal regulator synthesis]. Tyumen, Tyumenskiy gosudarstvennyy neftegazovyy universitet, 2008. 58 p.
5. Lozgachev G.I., Bezryadin M.M. *Sintez modalnogo regulyatora s kompensatsiyey vneshnego vozmushcheniya dlya obekta s paramet-*

- richeskoj neopredelennostyu po kriteriyu maksimalnoy robastnosti* [Synthesis of a modal controller with external disturbance compensation for an object with parametric uncertainty by maximal robustness]. *Trudy SPIIRAN*, 2012, Iss. 21, pp. 157–169.
6. Miroshnichenko V.G. *Voprosy sinteza modalnykh regulyatorov privodov stankov* [Issues of modal controller synthesis for drive machines]. Rostov n/D, DGTU Publ., 2009. 133 p.
  7. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698–713.
  8. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Osobennosti sinteza parametricheski grubyykh sistem modalnogo upravleniya s nablyudatelyami sostoyaniya [Features of synthesis of parametrically gross modal control systems with state observers]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 3–14.
  9. Tararykin S.V., Apolonskiy V.V., Terekhov A.I. Issledovanie vliyaniya polozhitelnykh obratnykh svyazey na robastnye svoystva sistem avtomaticheskogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Investigation of positive feedbacks influence on robust properties of automatic control systems with state regulators]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 9–15.
  10. Kopylov S.A., Sharov V.V. Sintez robastnykh modalnykh regulyatorov dlya stabiliziruyushchikh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Synthesis of modal robust controllers for stabilizing automatic control systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2010, no. 5–6, pp. 111–121.
  11. Osina A.V., Yagodkina T.V. Sintez sistem modalnogo upravleniya s identifikatorami [Synthesis of modal control systems with identifiers]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* 2013, no. 2, pp. 109–114.
  12. Likhodedov A.D., Portnyagin N.N. Analiz ispolzovaniya modalnogo regulirovaniya na vodonasosnykh stantsiyakh [Analysis of using modal control at pump station]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 17, pp. 50–58.
  13. Vinogradov A.B., Glazunov V.F., Gnezdov N.E., Lebedev S.K. Sistema upravleniya asinkhronnym elektroprivodom s nelineynym modalnym regulyatorom peremennoy struktury [Asynchronous electric control system with nonlinear variable structure modal controller]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti*, 2005, no. 2, pp. 87–90.
  14. Mazurov V.M., Fam Van Nguen. Modalnye regulatory dlya promyshlennykh obektov s zapazdyvaniem [Modal controllers for industrial facilities with delay]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2006, no. 11, pp. 19–22.
  15. Bhattacharyya S.P., Chapellat H., Keel L. Robust control: the parametric approach. *Prentice-Hall Information & System Science Series*. N.J., Prentice Hall, 1995. 672 p.
  16. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MatLab 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MatLab 6.0]. Saint Petersburg, Korona print, 2001. 320 p.
  17. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drives control systems]. Ed. by V.M. Terekhov. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 304 p.
  18. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
  19. Fedorenko A.A., Karagodin M.S. Linearizovannaya model asinkhronnogo dvigatelya [Linearized model of the induction motor]. *Optimizatsiya rezhimov raboty sistem elektroprivodov. Mezhvuzovskiy sbornik* [Optimization of electric drive system operation modes. High school proceedings]. Krasnoyarsk, KSTU Publ., 1992. 160 p.
  20. Korotkov M.F., Pakhomov A.N., Fedorenko A.A. Modalnoe upravlenie elektroprivodom peremennogo toka [Modal control of AC drive]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2011, no. 3, pp. 70–74.
  21. Lazovskiy N.F., Pakhomov A.N. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drives control system]. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t; politehn. in-t Publ., 2007. 83 p.
  22. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control AC drives]. Ivanovo, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiiy universitet imeni V.I. Lenina», 2008. 298 p.



УДК 621.316.722.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Горбунов Роман Леонидович,**

аспирант кафедры промышленной и медицинской электроники  
Института неразрушающего контроля ТПУ, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 30. E-mail: romangorbunov91@gmail.com

**Посконный Геннадий Ильич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники  
Новоуральского технологического института НИЯУ МИФИ,  
Россия, г. Новоуральск, ул. Ленина, д. 85. E-mail: pgi\_ngti@mail.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью создания силовых электронных преобразователей трёхфазного напряжения с высокими энергетическими показателями и улучшенной электромагнитной совместимостью с сетью и двигателем, имеющих простую и надёжную систему управления и относительно низкую стоимость.*

**Цель работы:** исследование предложенного трёхфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения, предназначенного для регулирования напряжения на статорных обмотках асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

**Методы исследования:** методы теории сигналов и систем, преобразовательной техники, схемотехнического и численного моделирования; экспериментальное исследование выполнялось на собранном макете преобразователя.

**Результаты:** получены регулировочная характеристика преобразователя, выражение для расчёта коэффициента гармоник в кривой выходного напряжения, приведены результаты схемотехнического моделирования и экспериментального исследования преобразователя, выполнено их сопоставление.

### **Ключевые слова:**

*Широтно-импульсный преобразователь переменного напряжения, регулирование напряжения, модуляция, ключ переменного тока, асинхронный двигатель.*

### **Введение**

Потребление электроэнергии в мире постоянно растёт и согласно прогнозам Международного энергетического агентства к 2035 г. увеличится на 47 % по сравнению с 2012 г. Значительную долю этого увеличения можно скомпенсировать повышением энергоэффективности промышленных предприятий, расходующих около 42 % всей генерируемой электроэнергии, из которых почти 70 % приходится на электродвигатели. Причём более чем в 90 % электроприводов либо нет возможности управлять энергопотреблением, либо это осуществляется неэффективно [1].

В связи с этим первостепенной задачей является повышение энергетических показателей и качества пусковых и тормозных режимов работы трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором – наиболее массового в промышленности. Решение этой задачи можно достичь за счёт регулирования напряжения на обмотках статора двигателя в зависимости от нагрузки на валу с целью снижения потребляемой активной/реактивной мощности, а также потерь в двигателе [2, 3]. Возможность перевода технологических механизмов в режим повторно-кратковременных включений приводит к экономии электроэнергии в пределах 30...70 % и снижению мощности исполнительных электродвигателей [4]. Кроме решения задач энергосбережения использование регуляторов напряжения позволяет расширить функциональные

возможности привода, повысить уровень автоматизации, а также обеспечить эффективную защиту двигателя и всей системы в целом.

Так как энергоэффективность, надёжность и стоимость системы зависит не только от двигателя, то важной задачей является повышение энергетических показателей регулятора напряжения при его максимальной простоте, надёжности и компактности, а также минимальной стоимости. Кроме этого, необходимо учитывать электромагнитную совместимость устройства с двигателем, с питающей сетью и с другими сетевыми потребителями. В противном случае достигаемое улучшение показателей двигателя может оказаться нецелесообразным.

### **Преобразователи переменного напряжения с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте**

На сегодня имеется множество технических решений, позволяющих осуществлять регулирование напряжения на обмотках двигателя [5–9]. Одним из наиболее перспективных является использование непосредственных преобразователей переменного напряжения с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте (далее ШИП переменного напряжения). В отличие от преобразователей напряжения с фазовым регулированием или широтно-импульсным регулированием на пониженной частоте, в основном используемых в

промышленности, ШИП переменного напряжения обладают высокими энергетическими показателями и лучшей электромагнитной совместимостью с питающей сетью и двигателем, а также позволяют снизить потери в переходных режимах работы [10]. Высокое качество выходного напряжения с отсутствием низкочастотных гармонических составляющих, близкий к единице коэффициент мощности, широкий диапазон и высокая плавность регулирования, отсутствие влияния изменения нагрузки на выходное напряжение, возможность двусторонней передачи энергии являются важными достоинствами устройств этого класса. Благодаря высокой частоте коммутации  $f_k$  (единицы–десятки килогерц) ШИП переменного напряжения практически безынерционны, что положительно влияет на качество переходных процессов, а также позволяет компенсировать искажения и колебания сетевого напряжения [11], повышая тем самым стабильность и надёжность работы системы. Также ШИП переменного напряжения способны выполнять квазичастотное управление двигателем по различным алгоритмам [10, 12].

При работе преобразователя на асинхронный электродвигатель основное требование предъявляется к выходному току [13], спектральный состав которого определяется формой выходного напряжения. Так как двигатель представляет собой индуктивную нагрузку, то увеличение частоты высших гармонических составляющих выходного напряжения приводит к уменьшению амплитуды гармоник тока двигателя. Но с энергетической точки зрения увеличение частоты коммутации нежелательно, так как это ведёт к возрастанию коммутационных потерь в преобразователе. Поэтому важным достоинством ШИП переменного напряжения является возможность широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения по различным законам, в частности, с целью подавления высших гармоник с наименьшей частотой [14, 15] (которые в основном и влияют на качество тока двигателя), тем самым получая спектральный состав, аналогичный для случая двухкратного увеличения частоты коммутации, но при тех же коммутационных потерях в преобразователе.

ШИП переменного напряжения позволяют реализовать ещё один способ улучшения формы выходного тока – снижение амплитуд высших гармоник напряжения. Указанного результата можно достичь, применяя алгоритмы ШИМ с изменением частоты коммутации по случайному закону [16]. В связи с распределением искажений по разным частотам амплитуды высших гармоник существенно уменьшаются и эффективно фильтруются индуктивностями двигателя.

При синусоидальном фазном токе, что обычно имеет место в устройствах этого класса, спектр потребляемого из сети тока  $i_c$  аналогичен спектру фазного напряжения. Поэтому использование малогабаритных и относительно дешёвых сетевых фильтров позволяет получить практически синус-

оидальный входной ток преобразователя, то есть высокий коэффициент мощности. Применение указанных выше способов повышения качества выходного напряжения за счёт ШИМ также приводят к улучшению спектрального состава потребляемого из сети тока.

В ШИП переменного напряжения имеется возможность регулирования сдвига по фазе между сетевым током и напряжением при использовании специальных алгоритмов ШИМ [17]. Другими словами, удаётся регулировать потребляемую из сети реактивную мощность и, в частности, поддерживать полный коэффициент мощности системы равным единице при различных режимах работы двигателя.

Реализация ШИП переменного напряжения связана с использованием полностью управляемых двунаправленных ключей, выполняемых на основе однонаправленных приборов (транзисторов и диодов) по различным схемам [18]. С учётом различия в топологии схем и типе используемого ключа возможно построение большого количества преобразователей. Предложенные на сегодня схемы трёхфазных ШИП переменного напряжения имеют ряд недостатков, которые выражаются в искажении фазных напряжений двигателя [10], низком коэффициенте полезного действия [19, 20], большом количестве управляемых полупроводниковых приборов [10, 18], сложных и ненадёжных при реализации алгоритмах коммутации ключей [10, 21, 22], влиянии характера и величины нагрузки на формируемое напряжение [23] и др. Поэтому разработка схемы ШИП переменного напряжения с высоким качеством регулирования при минимальном количестве управляемых приборов, простой и надёжной системе управления без необходимости согласования её работы с токами и напряжениями силовой цепи до сих пор остаётся актуальной задачей.

#### Описание предложенного шип переменного напряжения

Схема исследуемого преобразователя изображена на рис. 1.

Основные допущения, принимаемые при анализе:

- входное трёхфазное напряжение и обмотки фаз двигателя симметричны;
- активные и индуктивные сопротивления обмоток фаз являются линейными;
- насыщение магнитопровода машины не учитывается;
- транзисторные ключи и диоды являются идеальными.

Анализ переходных процессов удобно проводить с использованием эквивалентной Т-образной схемы замещения фазы двигателя (рис. 3, б, в).

Силовая часть преобразователя состоит из трёхфазного диодного мостового выпрямителя VD1–VD6, включённого в рассечку нулевой точки обмоток статора, полностью управляемого ключа

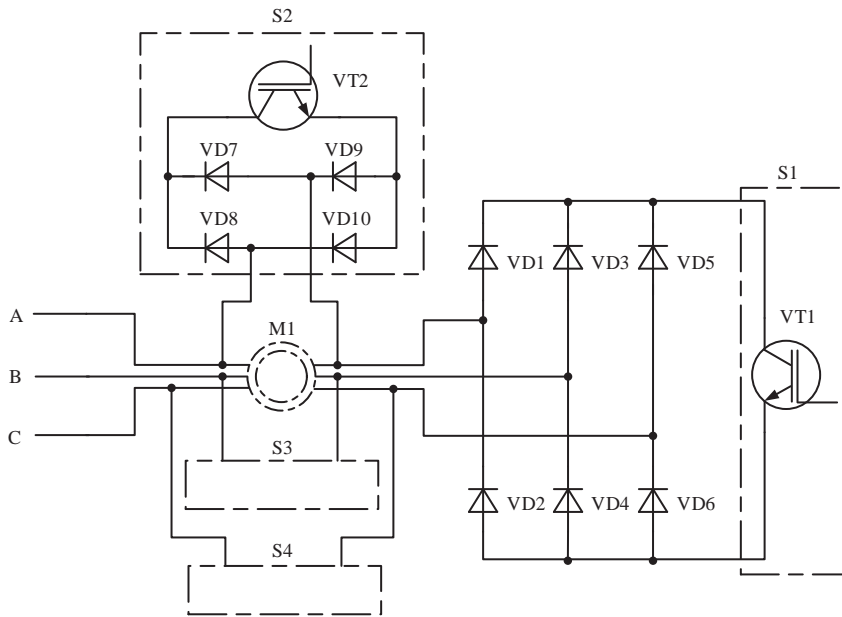


Рис. 1. Схема функциональная исследуемого ШИП переменного напряжения

S1, включённого в цепь выпрямленного тока выпрямителя, и трёх ключей переменного тока S2–S4, включённых параллельно обмоткам статора.

Схема работает в два такта.

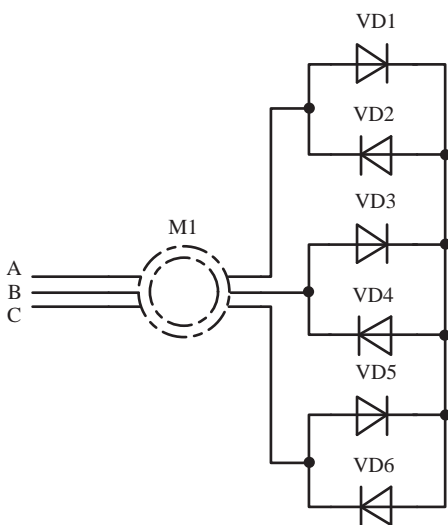


Рис. 2. Схема подключения двигателя к сети при замыкании ключа S1

На интервале времени  $t_p$  замкнут ключ S1 (напряжение управления  $u_{ge1} > 0$ ), ключи S2–S4 разомкнуты. Выпрямитель находится в режиме короткого замыкания, и двигатель оказывается подключённым к сети со встречно параллельно включёнными диодами в каждой фазе (рис. 2, 3, б). Структура диод–диод обладает двухсторонней проводимостью, поэтому одновременно в проводящем состоянии оказываются по одному диоду каждой фазы. Напряжение  $u_1$  на каждой фазе двигателя повторяет форму сетевого напряжения  $u_c$  (рис. 3, а).

Ток фазы двигателя  $i_1$ , равный сумме токов намагничивания  $i_m$  и ротора  $i_2'$ , нарастает (из-за индуктивностей  $L_1, L_m, L_2'$ ) (рис. 3, а, б).

На интервале времени  $T_k - t_p$  ключ S1 разомкнут, а ключи S2–S4 замкнуты (рис. 3, в), в результате чего токи  $i_m, i_2'$  и  $i_1$  продолжают протекать в фазных обмотках двигателя, уменьшаясь по величине (рис. 3, а).

Таким образом, изменяя относительное время  $\chi_k = t_p / T_k$  подключения двигателя к сети (коэффициент заполнения), на выходе преобразователя (на нагрузке) можно формировать переменное напряжение регулируемой величины.

В исследуемой схеме замыканием каждой обмотки отдельным двунаправленным ключом S2–S4, на время разомкнутого состояния ключа S1, достигается непрерывность протекания тока через статорные обмотки двигателя. Тем самым запасённая в двигателе за время подключения к сети энергия циркулирует в обмотках, поддерживая его работу, а не рассеивается в виде тепла в демпфирующих цепях, как например в [20]. При этом практически исключаются перенапряжения на ключе S1 за счёт обеспечения неразрывности протекания тока в нагрузке, а потери энергии в преобразователе складываются лишь из потерь проводимости ключей и динамических потерь в ключах при коммутациях.

Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя и элементов силовой схемы, при синусоидальном токе двигателя, изображены на рис. 4. Для наглядности число импульсов на периоде  $M = f_k / f_c = 18$ , коэффициент заполнения  $\chi_k = 0,6$ .

В случае постоянной длительности импульсов на всем периоде сетевого напряжения в спектре имеются гармонические составляющие с частотами  $f_{(n)} = (n-1)f_k \pm f_c, n \in Z$ , (рис. 5) и амплитудами (рис. 6)

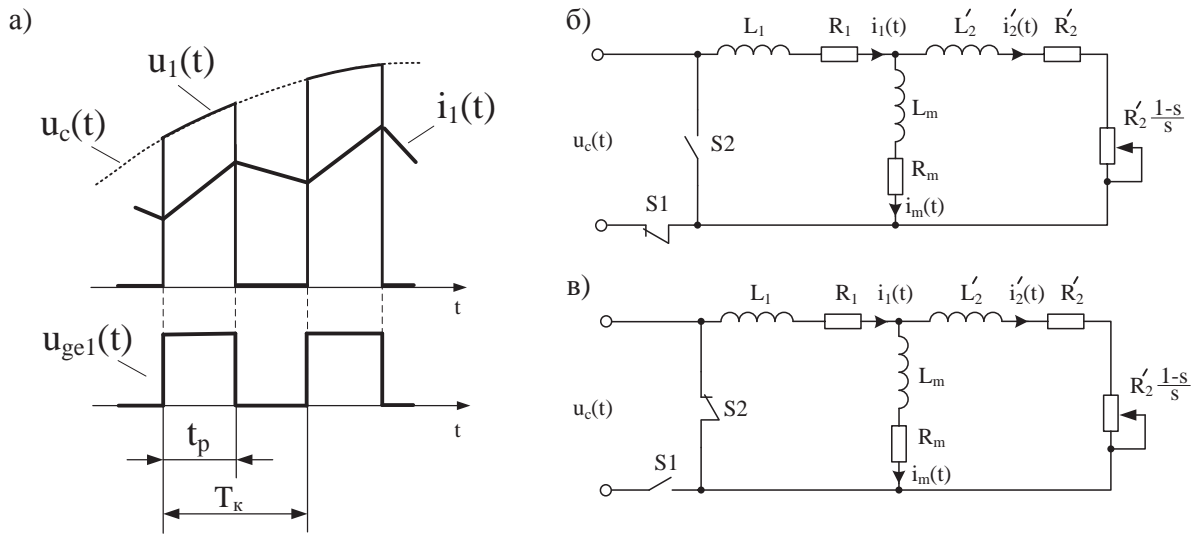


Рис. 3. Переходные процессы в преобразователе (а) и эквивалентные схемы замещения фаз (б, в) на интервалах работы преобразователя

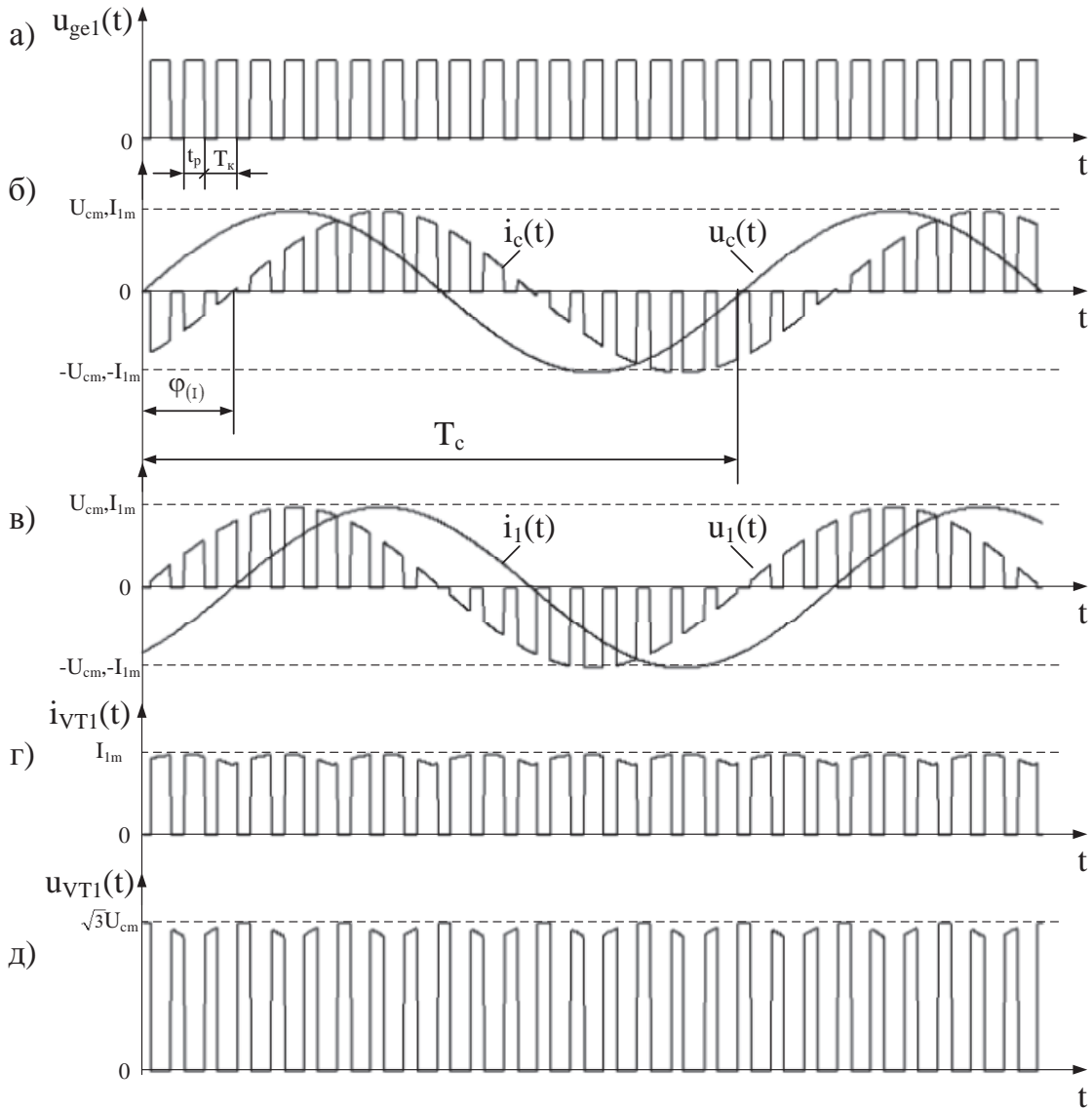


Рис. 4. Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя



$$U_{1m(n)} = U_{cm} \chi_k \frac{\sin((n-1)\pi\chi_k)}{(n-1)\pi\chi_k},$$

$$K_U = \frac{U_{1m(1)}}{U_{cm}} = \chi_k,$$

где  $U_{cm}$  – амплитуда сетевого напряжения.

Амплитуда первой гармоники напряжения ( $n=1$ )

$$U_{1m(1)} = U_{cm} \chi_k,$$

то есть её зависимость от коэффициента заполнения линейна, что упрощает реализацию системы управления.

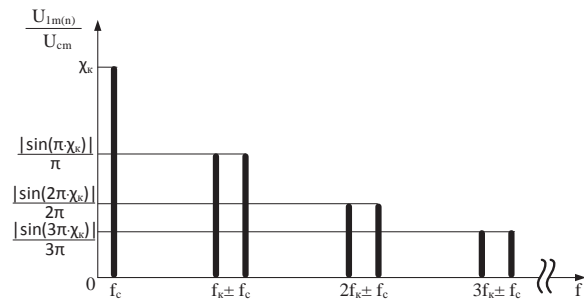


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выходного напряжения

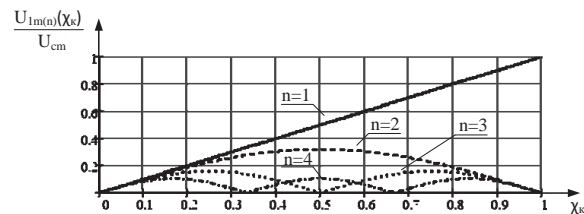


Рис. 6. Зависимость относительных амплитуд первых 7-ми ненулевых гармоник выходного напряжения от коэффициента заполнения

Коэффициент гармоник выходного напряжения зависит от коэффициента заполнения

$$K_{Gu}(\chi_k) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_{(n)})^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \sqrt{\frac{1}{\chi_k} - 1} \cdot 100.$$

Очевидно, что при такой форме напряжения с увеличением коэффициента заполнения коэффициент гармоник уменьшается (рис. 7).

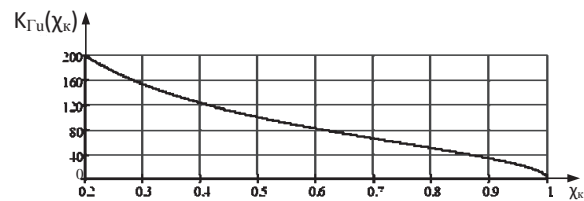


Рис. 7. Зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от коэффициента заполнения

Так как электродвигатель является относительно инерционным объектом управления, то при частотах коммутации единицы–десятки килогерц (что характерно для рассматриваемого устройства) ШИП переменного напряжения можно рассматривать как безынерционное звено системы управления электропривода с коэффициентом передачи (по первой гармонике)

то есть регулируемым в диапазоне 0...100 %.

По сравнению с другими известными устройствами предложенный преобразователь (рис. 1) обладает рядом достоинств:

- 1) при регулировании в цепи выпрямленного тока статора удаётся реализовать импульсный способ регулирования напряжений в статорной цепи двигателя с минимальным количеством управляемых приборов в силовой схеме [7, 12];
- 2) использование диодных мостовых ключей переменного тока для замыкания обмоток статора двигателя на время паузы позволяет уменьшить количество управляемых вентилей в схеме и исключает необходимость контроля полярности напряжений и направления токов.

Кроме того, выбор диодных мостовых ключей переменного тока обусловлен ещё несколькими причинами.

Применение двухтранзисторных ключей переменного тока в широтно-импульсном преобразователе переменного напряжения позволяет уменьшить общие потери за счёт уменьшения числа элементов. Однако при управлении требуется синхронизация переключения транзисторов с сетевым напряжением [21] или токами и напряжениями нагрузки [10, 22], что в целом усложняет систему управления. Но более существенным является то, что ошибка в определении полярности тока/напряжения приводит к нарушению работы устройства или возникновению коротких замыканий в силовой схеме [23]. Эта проблема особенно актуальна для преобразователей, используемых при высоком уровне внешних помех или на объектах с маломощной сетью, где зачастую возникают колебания и скачки напряжений [4, 17]. Использование же модифицированных алгоритмов переключения транзисторов без токовых пауз, которые могут быть реализованы без синхронизации, приводит к влиянию изменения нагрузки на форму выходного напряжения [23].

Несмотря на необходимость ввода паузы между переключениями, характеристики современных транзисторов позволяют её уменьшить до незначительной величины, благодаря чему использование в предлагаемой схеме одной маломощной и малогабаритной демпфирующей цепи исключает перенапряжения на ключевых элементах при коммутациях, в то время как влияние на энергетические и массогабаритные показатели устройства практически отсутствует.

#### Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование

Моделирование устройства было выполнено в пакете Matlab Simulink. В составленной модели (рис. 8) сигналы управления ключами формируются генератором прямоугольных импульсов постоянной частоты и поступают непосредственно на

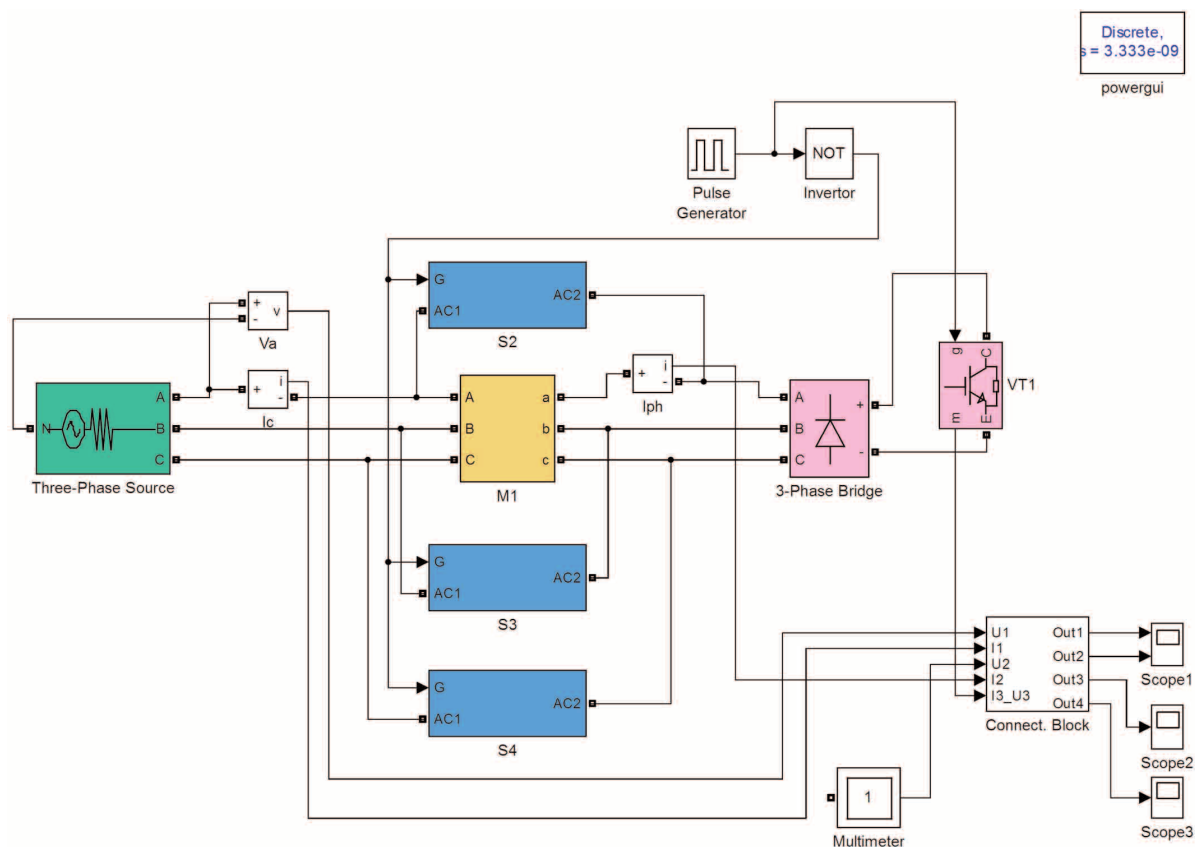


Рис. 8. Исследуемая схема в Simulink

вход управления транзистором VT1. Инвертированный сигнал подаётся на входы управления ключей S2–S4, представленных в модели блоками диодно-транзисторных ключей. Параметры блока двигателя (M1) были установлены согласно экспериментально измеренным для трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором марки АИР90L4: мощность 2,2 кВт, линейное напряжение 380 В, номинальный фазный ток 5,2 А, частота вращения при номинальной нагрузке 1420 об/мин.

Экспериментальное исследование преобразователя выполнялось на собранном макете на IGBT-транзисторах. Для реализации ШИР была разработана система управления (с независимым управлением каждым ключом от индивидуального драйвера) и соответствующее программное обеспечение [24]. Блок управления построен на 8-разрядном микроконтроллере семейства AVR – ATmega32.

Результаты моделирования и экспериментов при работе преобразователя (без фильтров) на двигатель АИР90L4 с номинальной нагрузкой на валу приведены на рис. 9–11. Напряжение сети  $U_c=220$  В,  $f_c=50$  Гц, частота коммутации транзисторов преобразователя  $f_k=3$  кГц, коэффициент заполнения  $\chi_k=0,76$ . По осям абсцисс диаграмм, полученных при моделировании, указано время в се-

кундах, по осям ординат – напряжение в вольтах и ток в амперах. Для осциллограмм напряжения масштаб 90 В/дел., для осциллограмм тока масштаб 3,5 А/дел.

Для подавления перенапряжений, возникающих на ключах схемы при паузах между коммутациями, использовалась демпфирующая RCD-цепь, установленная на транзисторе VT1. При этом потери мощности в демпфирующей цепи не превышали 23-х ватт.

На рис. 12–14 приведены спектры выходного напряжения и тока, спектр сетевого тока. Очевидно, что ток двигателя непрерывный и практически синусоидальный. Напряжение на фазе двигателя имеет характерную для широтно-импульсного регулирования форму, огибающая повторяет кривую сетевого напряжения. Напряжение на ключах S2, S3, S4 полностью повторяет напряжение на соответствующих фазах двигателя, так как они включены параллельно фазам. Сетевой ток имеет аналогичные напряжению на фазе двигателя форму и спектр.

В таблице приведены значения коэффициентов гармоник выходного напряжения, входного и выходного тока преобразователя, изображённых на рис. 9–11. Расчёт выполнялся с учётом гармоник до  $k=1000$ . Результаты показывают, что коэффициент искажения выходного тока для этой скваж-

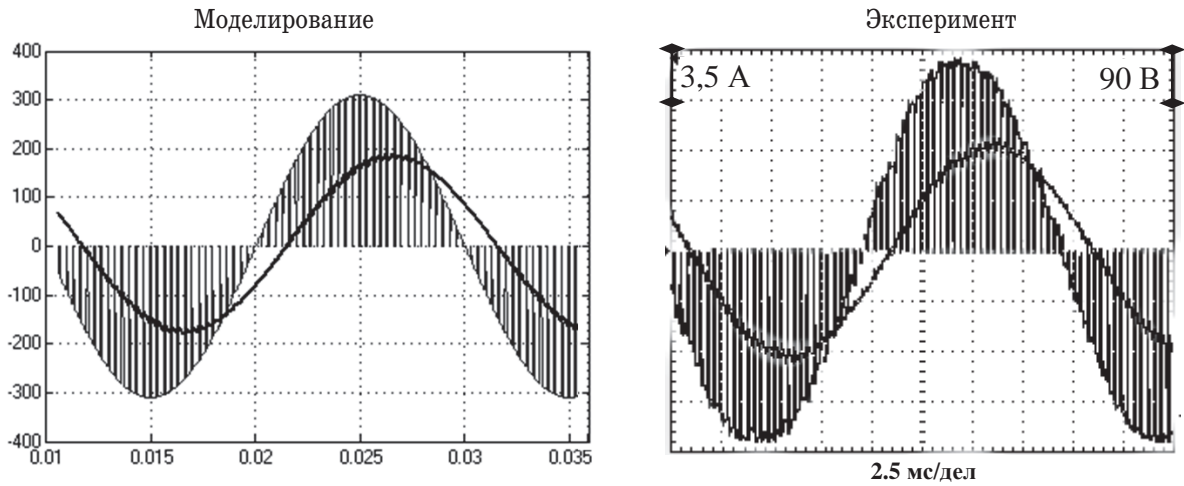


Рис. 9. Диаграммы напряжения и тока на выходе преобразователя

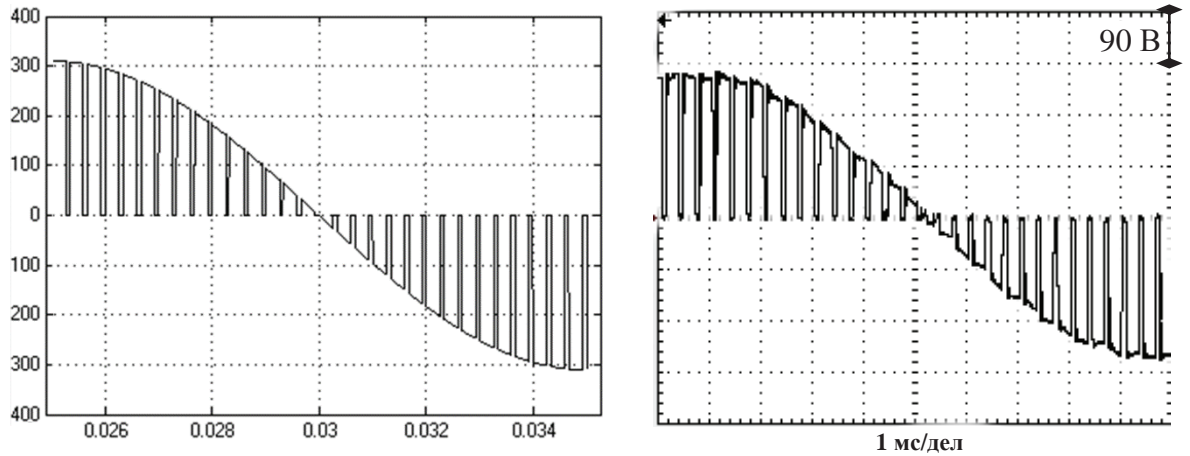


Рис. 10. Диаграммы напряжения на выходе преобразователя

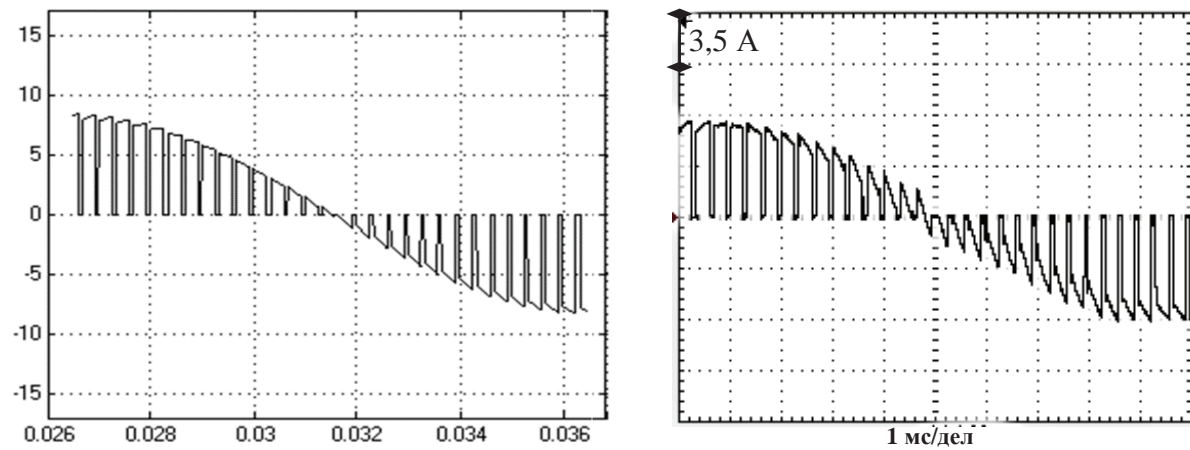


Рис. 11. Диаграммы потребляемого из сети тока

Таблица. Значения коэффициента гармоник

	Коэффициент гармоник, %		
	$u_1$	$i_1$	$i_c$
Моделирование	54,8	2,2	55,6
Эксперимент	58,3	6,5	59,9

ности составляет единицы процентов. Степень искажения входного тока и выходного напряжения практически одинакова.

#### Выводы

Полученные экспериментальным путём диаграммы токов и напряжений соответствуют вре-

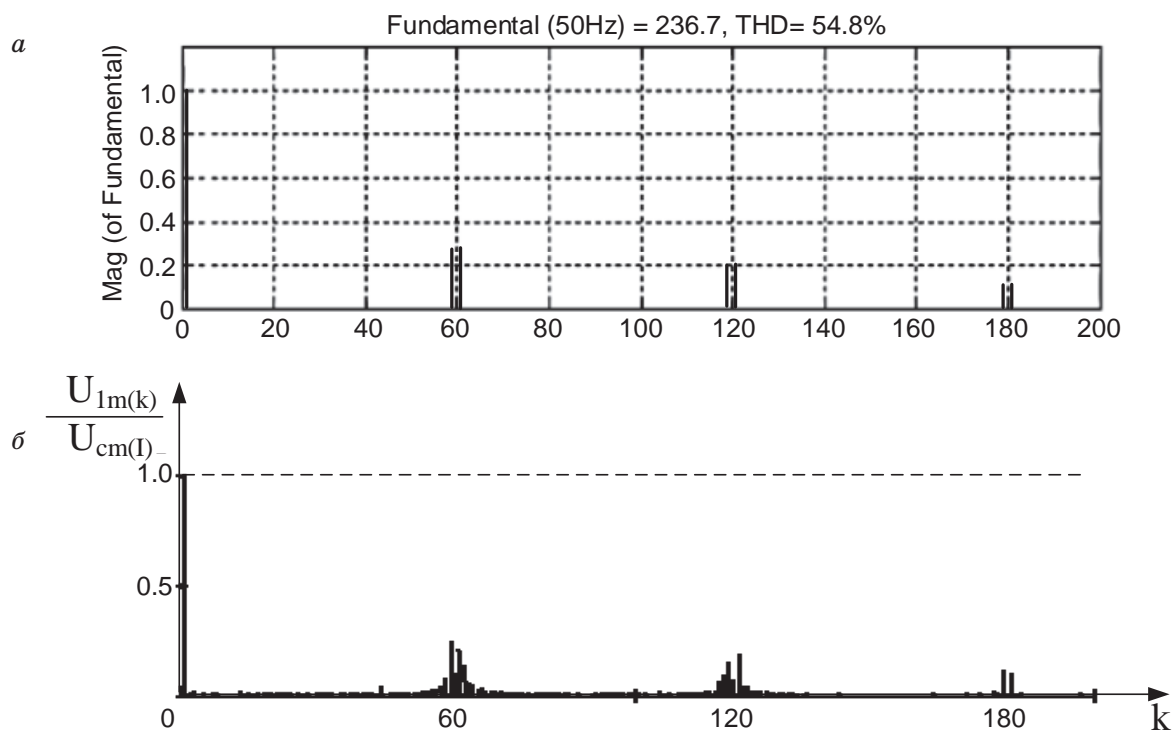


Рис. 12. АЧХ выходного напряжения преобразователя: а) моделирование, б) эксперимент

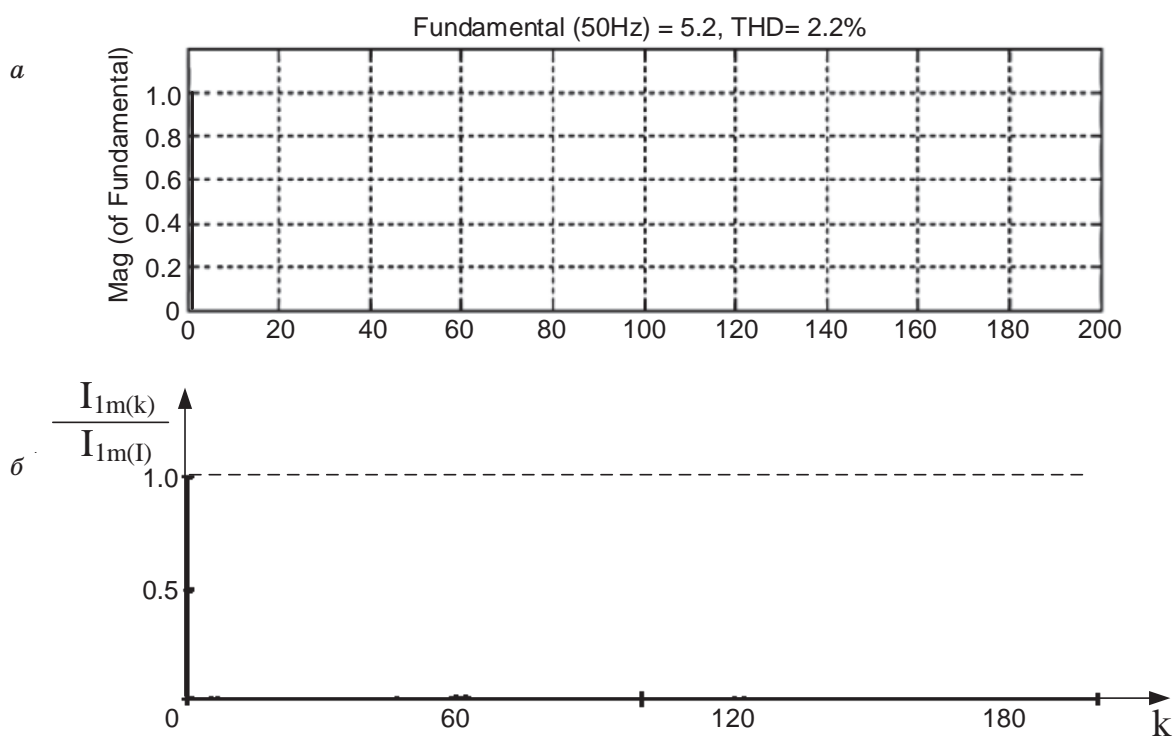


Рис. 13. АЧХ выходного тока преобразователя: а) моделирование, б) эксперимент

менным диаграммам, полученным при анализе работы преобразователя и при компьютерном моделировании. Эксперименты показали, что преобразователь выполняет заложенные функции с требуемыми показателями, а также подтвердили право-

мерность принятых при анализе допущений и правильность составленной математической модели.

Несмотря на то, что потребляемый из сети ток не является синусоидальным, высокочастотные составляющие могут быть легко отфильтрованы с



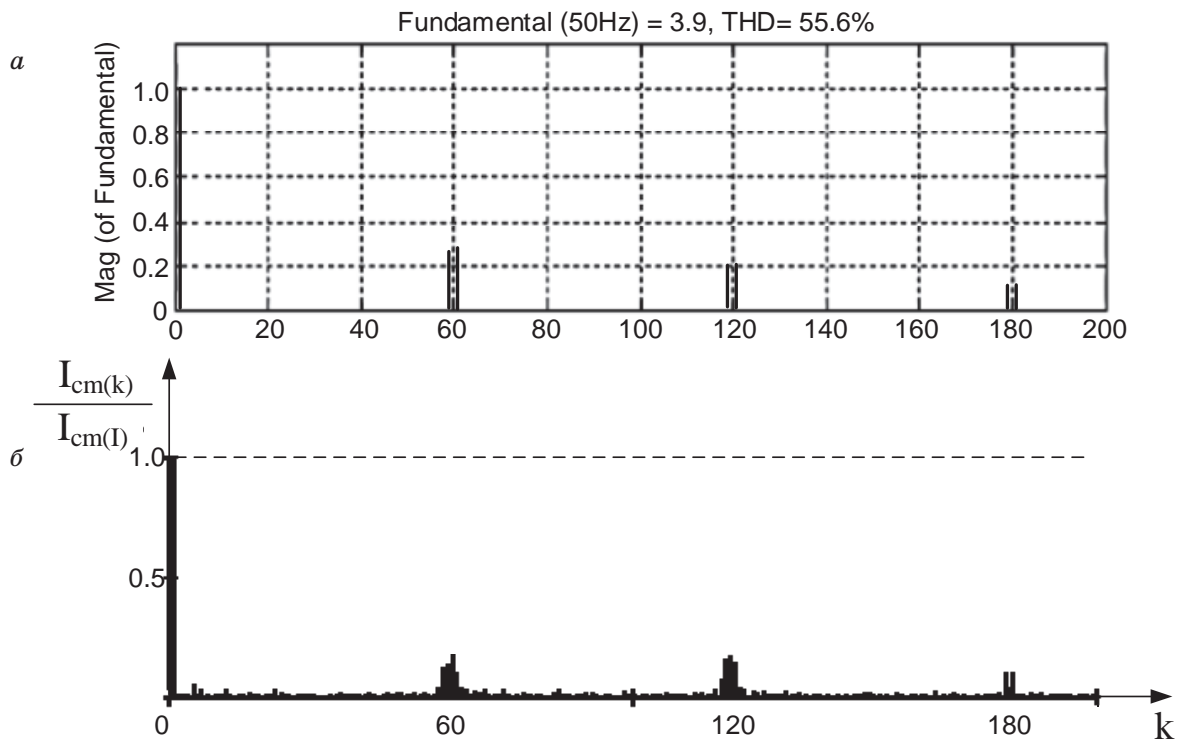


Рис. 14. АЧХ потребляемого из сети тока: а) моделирование, б) эксперимент

помощью малогабаритных и относительно простых сетевых фильтров, что позволяет повысить коэффициент мощности устройства и улучшить электромагнитную совместимость системы «широко-импульсный преобразователь – асинхронный двигатель» с питающей сетью.

Таким образом, предложенный ШИП переменного напряжения может использоваться

для регулирования напряжения на асинхронном двигателе, обеспечивая высокую энергоэффективность двигателя и всей системы в целом. Устройство обладает высокими энергетическими показателями, хорошей электромагнитной совместимостью с сетью и двигателем, не требуя при этом сложной и дорогой системы управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ABB Drives and Motors for Improving Energy Efficiency. – ABB brochure, 2012. – 16 p.
- Радина Е.В. Алгоритмы регулирования напряжения асинхронных двигателей // Электротехника. – 1983. – № 5. – С. 32–34.
- Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.
- Цитович Л.И., Шкаликов С.И., Дудкин М.М. Тиристорный преобразователь с интегрирующим фазосдвигающим устройством для мягкого пуска асинхронных электродвигателей // Проблемы энергетики. – 2005. – № 7–8. – С. 57–65.
- Bose V.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
- Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
- Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В. Энергосберегающие устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 52–55.
- Устройство для плавного пуска асинхронного двигателя: пат. RU 2294592 C1 Россия, МПК H02P1/16; заявл. 02.12.2005; опубл. 27.02.2007. – 3 с.
- Vasilyev D., Firago B. Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor // Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements Wroclaw University of Technology: Scientific Papers № 63, Studies and Research № 29. – Wroclaw, 2009. – P. 294–302.
- Control for PWM AC Chopper Feeding Nonlinear Loads / L. Rahmani, F. Krim, M. Khanniche, A. Bouafia // IJE. – 2004. – V. 91. – Iss. 3. – P. 149–163.
- A Novel Technique for AC Supply Voltage and Frequency Modulation of Induction Motor Drives / G. El-Saady, A.M. Sharaf, A. Makky, M.K. El-Sherbiny, G. Mohamed // Industry Applications Conference. – Orlando, FL, 1995. – V. 1. – P. 530–537.
- Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Бернштейн, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, П.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
- Sadr S.M., Mashhadi H.R. Application of PSO for Selective Harmonic Elimination in a PWM AC/AC Voltage Regulator // 2<sup>nd</sup> IC-SKE. – Mashhad, 2012. – P. 62–65.
- Voltage Quality Enhancement of PWM AC Voltage Controller Using Particle Swarm Optimization / A. Kouzou, S. Saadi, M. Mahmoudi, M. Boucherit // International Conference on

- Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Lisbon, 2009. – P. 309–314.
16. Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems – A Review / A.M. Trzynadlowski, F. Blandjerg, J.K. Pedersen, R.L. Kirlin, S. Legowski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – V. 30. – Iss. 5. – P. 1166–1175.
  17. Georgakas K., Safacas A. Modified Sinusoidal Pulse-Width Modulation Operation Technique of an AC-AC Single-Phase Converter to Optimise the Power Factor // IET Power Electronics. – 2010. – V. 3. – Iss. 3. – P. 454–464.
  18. Arvindan A.N., Prashanthi S. Investigation for Power Quality in a PWM AC Controller Feeding a Three-Phase Three-Wire WYE Connected Load // IPEC–2010. – Singapore, 2010. – P. 648–653.
  19. Hajimoradi M.R., Yazdian A., Mokhtari H. Double Stage Switch Mode AC Voltage Regulator // 2<sup>nd</sup> Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. – Tehra, 2011. – P. 187–192.
  20. Давыдкин М.Н. Разработка системы векторно-импульсного управления пуском синхронного электродвигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2010. – 16 с.
  21. Research on AC Chopper Power Module with Module Parallel Control / Z. Jie, Z. Yunping, Y. Weifu, L. Lin // APEC. – Austin, TX, 2008. – P. 1324–1327.
  22. Ahmed N.A., Amei K., Sakui M. A New Configuration of Single-Phase Symmetrical PWM AC Chopper Voltage Controller // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. – V. 46. – Iss. 5. – P. 942–952.
  23. Short Through Avoidance in AC-AC Choppers / M.M. Khan, Y. Han, M.A. Rizvi, Q.R. Butt // Electric Power Components and Systems. – 2013. – V. 41. – Iss. 11. – P. 1023–1040.
  24. Горбунов Р.Л., Посконный Г.И. Микропроцессорная система управления с широтно-импульсным регулированием фазных напряжений асинхронного электропривода // Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли: Труды VI Междунар. научно-техн. конф. – Новоуральск, 2012. – С. 78–79.

Поступила 04.12.2013 г.

UDC 621.316.722.3

## INVESTIGATION OF THREE-PHASE AC VOLTAGE CONVERTER, USED FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS

Roman L. Gorbunov,

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30.

E-mail: romangorbunov91@gmail.com

Gennadiy I. Poskonny,

Cand. Sc., Novouralsk Technological Institute,

Russia, Novouralsk, Lenin street, 85. E-mail: pgi\_ngti@mail.ru

*The urgency of the research is caused by the need to introduce three-phase power electronic converters, which have high efficiency, improved electromagnetic compatibility with supply network and motor, simple and reliable control system and relatively low price.*

**The main aim of the study:** to investigate the proposed three-phase AC voltage converter, intended to control the voltage applied to stator windings of a squirrel cage induction motor.

**The methods used in the study:** methods of the Theory of Signals and Systems, Power Electronics, numerical circuit modeling; experimental research was conducted by use of the implemented prototype of the proposed AC voltage converter.

**The results:** The authors describe output voltage control properties and output voltage THD expression, compare the results of computer modeling and experimental research of the proposed converter.

### Key words:

AC voltage converter, voltage regulation, modulation, AC switch, induction motor.

### REFERENCES

1. ABB Drives and Motors for Improving Energy Efficiency. *ABB brochure*, 2012. 16 p.
2. Radina E.V. Algoritmy regulirovaniya napryazheniya asinkhronnykh dvigateley [Algorithms of induction motors voltage regulation]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1983, vol. 5, pp. 32–34.
3. Ilinskiy N.F., Rozhankovskiy Y.V., Gornov A.O. *Energoberegayushchaya tekhnologiya elektrosnabzheniya narodnogo khozyaystva. Energoberezhenie v elektroprivode* [Energy saving technology of national economy energy supply. Energy saving in electric drive]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. B. 2, 127 p.
4. Tsitovich L.I., Shkalikov S.I., Dudkin M.M. Tiristornyye preobrazovateli s integriruyushchimi fazosdvigayushchimi ustroystvom dlya myagkogo puskas asinkhronnykh elektrodvigateley [A thyristorised converter with integrating phase-shift device for soft start of induction motors]. *Problemy energetiki – Problems of Energetics*, 2005, no. 7–8, pp. 57–65.
5. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
6. Zinovev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. P. 2, 197 p.
7. Braslavskiy I.Ya. *Asinkhronnyy poluprovodnikovyy elektroprivod s parametricheskim upravleniem* [An induction motor electric drive with parametric control]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 224 p.
8. Zinovev G.S., Udovichenko A.V. Energoberegayushchie ustroystva plavnogo puskas dvigateley peremennogo napryazheniya [Energy saving soft starters for AC motors]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 52–55.

9. Sidorov D.S., Sidorov S.N. *Ustroystvo dlya pлавного pushka asinhronnogo dvigatelya* [An induction motor soft starter]. Patent RF, no. 2294592 C1, 2005.
10. Vasilyev D., Firago B. *Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor*. Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements Wrocław University of Technology: Scientific Papers № 63, Studies and Research № 29. Wrocław, 2009. pp. 294–302.
11. Rahmani L., Krim F., Khanniche M., Bouafia A. Control for PWM AC Chopper Feeding Nonlinear Loads. *IJE*, 2004, vol. 91, Iss. 3, pp. 149–163.
12. El-Saady G., Sharaf A.M., Makky A., El-Sherbiny M.K., Mohamed G. A Novel Technique for AC Supply Voltage and Frequency Modulation of Induction Motor Drives. *Industry Applications Conference*. Orlando, FL, 1995. Vol. 1, pp. 530–537.
13. Bernshteyn A.Ya., Gusyatskiy Yu.M., Kudryavtsev A.V., Sarbatov R.S. *Tiristornye preobrazovateli chastoty v elektroprivode* [Thyristorised frequency converters in an electric drive]. Moscow, Energiya, 1980. 328 p.
14. Sadr S.M., Mashhadi H.R. Application of PSO for Selective Harmonic Elimination in a PWM AC/AC Voltage Regulator. *2<sup>nd</sup> IC-CKE*. Mashhad, 2012. pp. 62–65.
15. Kouzou A., Saadi S., Mahmoudi M. Boucherit M. Voltage Quality Enhancement of PWM AC Voltage Controller Using Particle Swarm Optimization. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Lisbon, 2009. pp. 309–314.
16. Trzynadlowski A.M., Bładziejg F., Pedersen J.K., Kirlin R.L., Legowski S. Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems – A Review. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1994, vol. 30, Iss. 5, pp. 1166–1175.
17. Georgakas K., Safacas A. Modified Sinusoidal Pulse-Width Modulation Operation Technique of an AC-AC Single-Phase Converter to Optimise the Power Factor. *IET Power Electronics*, 2010, vol. 3, Iss. 3, pp. 454–464.
18. Arvindan A.N., Prashanthi S. Investigation for Power Quality in a PWM AC Controller Feeding a Three-Phase Three-Wire WYE Connected Load. *IPEC-2010*. Singapore, 2010. pp. 648–653.
19. Hajmoradi M.R., Yazdian A., Mokhtari H. Double Stage Switch Mode AC Voltage Regulator. *2<sup>nd</sup> Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*. Tehra, 2011. pp. 187–192.
20. Davydkin M.N. *Razrabotka sistemy vektorno-impulsnogo upravleniya pushkom sinkhronnogo elektrodvigatelya*. Kand. Diss. [Design of the vector-pulse start control system for an induction motor. Cand. Diss.]. Magnitogorsk, 2010. 16 p.
21. Jie Z., Yunping Z., Weifu Y., Lin L. Research on AC Chopper Power Module with Module Parallel Control. *APEC*. Austin, TX, 2008. pp. 1324–1327.
22. Ahmed N.A., Amei K., Sakui M. A New Configuration of Single-Phase Symmetrical PWM AC Chopper Voltage Controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, Iss. 5, pp. 942–952.
23. Khan M.M., Han Y., Rizvi M.A., Butt Q.R. Short Through Avoidance in AC-AC Choppers. *Electric Power Components and Systems*, 2013, vol. 41, Iss. 11, pp. 1023–1040.
24. Gorbunov R.L., Poskonny G.I. Mikroprotseornaya sistema upravleniya s shirotno-impulsnym regulirovaniem faznykh napryazheniy asinhronnogo elektroprivoda [Microprocessor based control system of pulse-width control of induction drive phase voltages]. *Avtomatizatsiya i progressivnye tekhnologii v atomnoy otrasli: Trudy VI mezhdunarodnoy nauchno-tekhicheskoy konferentsii* [Proc. 6<sup>th</sup> Int. Scient. Technol. Conference. Automation and Progressive Technologies in Nuclear Field]. Novouralsk, 2012, pp. 78–79.

УДК 62-83 (075.8)

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИНУС-ФИЛЬТРА ДЛЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Пустоветов Михаил Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент, директор НИИЦ «Криотрансэнерго» Ростовского государственного университета путей сообщения, Россия, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2. E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена расширением применения в отечественной практике использования частотно-регулируемого электропривода дополнительных опций, в число которых входит синус-фильтр; востребованностью разработки синус-фильтров на основе отечественных комплектующих.

**Цель работы:** сформулировать рекомендации по выбору параметров синус-фильтров и корректному подбору элементов по току; рассмотреть явления, возникающие при включении ёмкости на клеммы нагрузки, содержащей асинхронный двигатель: компенсацию и перекомпенсацию реактивной мощности, самовозбуждение.

**Методы исследования:** испытания на реальной технологической установке; имитационное компьютерное моделирование электромеханической системы с полупроводниковым преобразователем на основе сочетания схемотехнического и операционного принципов составления модели.

**Результаты:** описаны некоторые итоги опыта проектирования и испытаний синус-фильтра для мощного высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением. Приведены сравнительные результаты компьютерного моделирования процессов при различных параметрах синус-фильтра и преобразователя. Даны рекомендации по проектированию синус-фильтров.

**Ключевые слова:**

Преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция напряжения, синус-фильтр, асинхронный двигатель, ёмкость, реактивная мощность, самовозбуждение, ток.

С целью сглаживания фронтов импульсов широтно-импульсно модулированного (ШИМ) напряжения, подаваемого на клеммы асинхронных двигателей (АД) от преобразователей частоты (ПЧ) используются выходные фильтры между ПЧ и АД [1]. Негативное влияние ШИМ-напряжения на электрооборудование при отсутствии выходного фильтра выражается в: высокочастотном шуме АД; возрастании уровня электромагнитных помех; электрокоррозии и разрушении подшипников АД и приводимых механизмов; постепенной деградации электрической изоляции, сопровождаемой интенсивным образованием озона, что вредно для персонала.

Вариант решения проблемы – использование синус-фильтра (СФ). Он выполняет максимальное приближение формы выходного напряжения ПЧ к синусоиде, тем самым минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих междофазного напряжения  $k_U$  [2] и аналогичного коэффициента  $k_{I2}$  для тока  $I_2$  [3]. Целесообразно, во всяком случае для частоты основной гармоники выходного напряжения ПЧ  $f_1=50$  Гц, предъявлять требование соответствия выходного напряжения после СФ по  $k_U$  сетевому напряжению (не более 12 % согласно [2]). Сложность выбора параметров СФ возрастает при несущей частоте ШИМ ПЧ  $f_n < 2$  кГц – получается значительная ёмкость (свыше 1000 мкФ). Это обстоятельство заставляет обратить внимание на возможные особенности, а также положительные и отрицательные эффекты включения емкости на клеммы нагрузки, содержащей АД. Рассмотрим далее несколько конкретных положений.

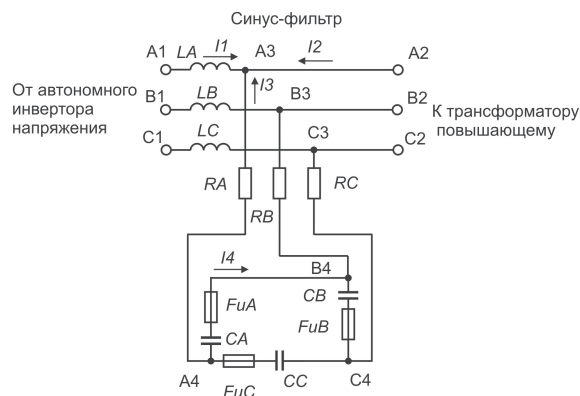


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная СФ

1. Ток через емкости СФ возрастает при уменьшении нагрузки на валу АД.
2. Ёмкость может кроме функции элемента СФ выполнять также функцию компенсации реактивной мощности АД и повышающего трансформатора.
3. Значительная емкость с большой вероятностью будет составной из нескольких параллельно соединенных конденсаторов, возможно, разного номинала и с различными характеристиками.
4. Ёмкость СФ может образовывать резонансные контуры с индуктивностями в различных ветвях схемы.
5. При пропадании напряжения на выходе ПЧ емкость СФ, оставаясь подключенной к контуру нагрузки, содержащей АД, может привести к самовозбуждению АД, сопровождающемуся значительными токами и напряжениями.



Дальнейшие пояснения будут даны на примере конкретной технологической установки – электропривода насоса 14Д6 водонасосной станции (ВНС) на базе четырёхполюсного АД с номинальным линейным напряжением 6 кВ и номинальной мощностью на валу  $P_{2H}=630$  кВт. Расчетные параметры схемы замещения АД опубликованы в [1, 4]. При номинальном режиме работы насоса нагрузка АД составляет  $0,73P_{2H}$ . Питание АД осуществляется по двухтрансформаторной схеме [1, 5] от ПЧ «Веспер EI-7009-1000H», имеющего диапазон несущих частот ШИМ  $f_n=1...2,5$  кГц и наибольший допустимый действующий выходной ток фазы в длительном режиме  $I_{1предел}=1600$  А. Индуктивная ветвь СФ в каждой фазе представлена парой параллельно соединенных токоограничивающих реакторов РТСТ-820-0,0505 УЗ. Активное сопротивление одного реактора составляет 1,65 мОм. В тех случаях, где не оговорено отсутствие, подразумевается наличие в схеме согласно рис. 1 в линиях питания емкостной части СФ демпфирующих резисторов RA, RB и RC с номиналом 0,013468 Ом.

В ходе проведения пусконаладочных работ при емкости СФ 8360 мкФ на фазу и отсутствии в схеме на рис. 1 резисторов RA, RB и RC на частоте  $f_1$  около 12 Гц, около 27 Гц и особенно 41,9–42 Гц происходило заметное увеличение тока на выходе ПЧ. Около  $f_1=42$  Гц происходило отключение ПЧ по признаку «короткое замыкание на выходе ПЧ». Повышение тока, броски тока, колебания величины тока были видны в довольно широкой полосе прилегающих частот (ширина полосы 7 Гц и более). В этой связи использование функции ПЧ «перескок частоты» не будет эффективным. К тому же полоса частот резонанса тока может пригодиться на употребительный для работы и регулирования привода диапазон. Последовательно вынимая предохранители на конденсаторах по 1000 мкФ симметрично по фазам СФ, при ёмкости 3360 мкФ на фазу удалось достичь безостановочного пуска привода с темпом роста частоты от 0 до 50 Гц за 90 с при насосе, работающем на закрытую заслонку (то есть с пониженной нагрузкой). Тем не менее, качания тока с частотой порядка единиц герц продолжали присутствовать, в том числе при  $f_1=50$  Гц. Когда емкость фазы СФ уменьшили до 1360 мкФ, плавкие вставки перегорели в процессе пуска АД без нагрузки.

Первое положение иллюстрируется рис. 2, где изображены расчетные зависимости токов СФ (определены по мощности, выделяющейся на активном сопротивлении при пропускании через него тока) согласно схеме рис. 1 при  $f_1=50$  Гц. При аппроксимации графика тока  $I_4=f(P_2)$  кривой 6 на рис. 2 выражением

$$y=0,0000000001x^4-0,0000003028x^3+$$

$$+0,0002864698x^2-0,1487129951x+375,429507481$$

коэффициент детерминированности составляет  $R^2=0,9999999995$ . Напротив, ток через индуктивности СФ возрастает с увеличением нагрузки на валу АД. Все зависимости, показанные на рис. 2–8,

получены в результате имитационного компьютерного моделирования установившихся режимов работы электропривода. При построении имитационной модели электропривода использованы: подходы и соотношения для расчёта параметров СФ, приведенные в [1, 6–8], математическая модель трёхфазного АД [1, 9, 10], трёхфазного трансформатора [1, 11].

При необходимости определить действующее значение тока в переходном процессе, например, при частотном разгоне АД, следует выбрать для гармонического анализа кривую тока на интервале времени, равном периоду первой гармоники. Возведя кривую тока на периоде в квадрат, выполним ее гармонический анализ. Полученная в результате постоянная составляющая будет соответствовать мощности, которая выделится на активном сопротивлении в 1 Ом при протекании через него рассматриваемого тока. То есть корень квадратный из полученной постоянной составляющей – действующее значение тока с учетом всех гармоник на выбранном интервале времени.

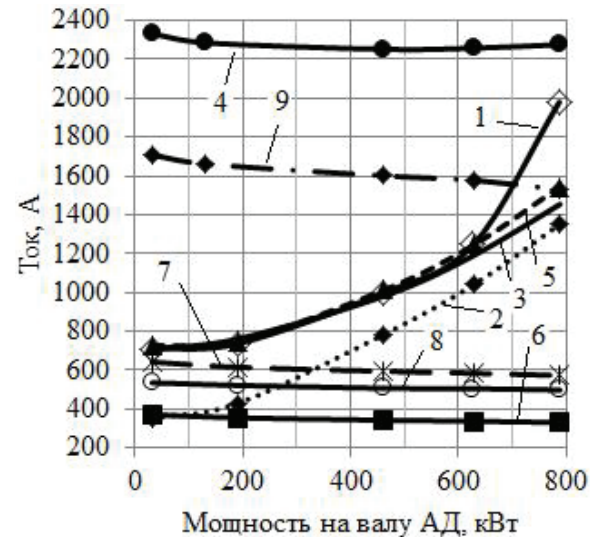
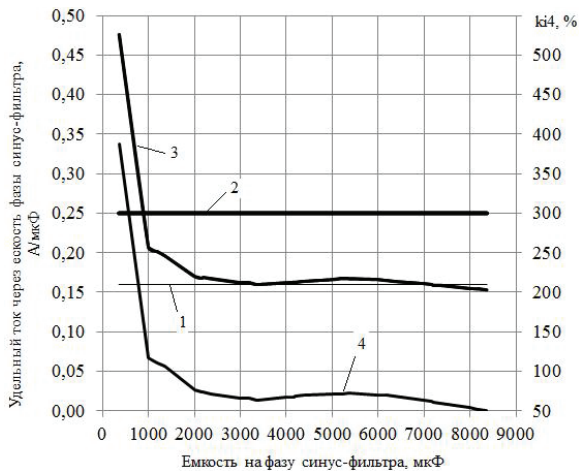


Рис. 2. Расчётные токи СФ: 1 –  $I_1=I_2$  без емкостей при  $f_n=2,5$  кГц; 2 –  $I_1$  при емкости СФ 2200 мкФ на фазу,  $f_n=2,5$  кГц; 3 –  $I_1$  при 2200 мкФ,  $f_n=1$  кГц; 4 –  $I_1$  при 8360 мкФ,  $f_n=2,5$  кГц и отсутствии демпфирующих резисторов; 5 –  $I_2$  при 2200 мкФ,  $f_n=2,5$  кГц (кривые  $I_2$  для остальных случаев весьма близки показанной); 6 –  $I_4$  при 2200 мкФ,  $f_n=2,5$  кГц; 7 –  $I_3$  при 2200 мкФ,  $f_n=2,5$  кГц; 8 –  $I_4$  при 2200 мкФ,  $f_n=1$  кГц; 9 –  $I_4$  при 8360 мкФ,  $f_n=2,5$  кГц и отсутствии демпфирующих резисторов

Второе положение также находит свое подтверждение на рис. 2: при емкости на фазу СФ 2200 мкФ ток на выходе СФ (ток нагрузки) превышает ток на входе СФ (потребляемый от ПЧ) за счет компенсации реактивной мощности нагрузкой емкостями СФ [6]. Явление известно для емкостных компенсаторов реактивной мощности АД [12, 13]. Из рис. 3 видно, что с ростом емкости СФ для  $I_4$  снижается  $k_{I4}$ . Это при прочих равных условиях происходит с ростом емкости за счет увеличения в гармоническом спектре тока  $I_4$  доли первой

гармоники, на которой и происходит компенсация реактивной мощности.

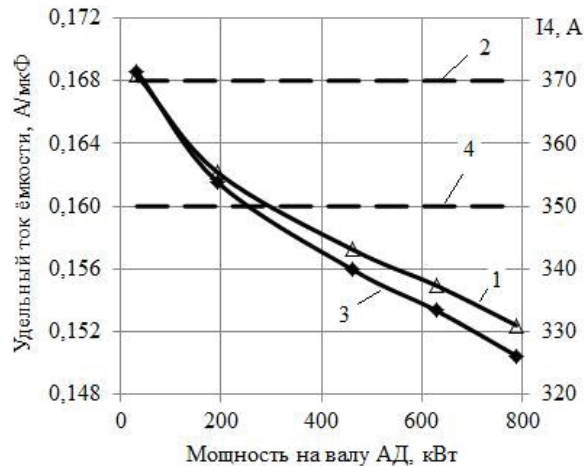
Однако из того же рис. 2 видно, что при емкости на фазу СФ 8360 мкФ выходной ток ПЧ значительно превышает ток нагрузки и мало зависит от изменения мощности на валу АД. Одновременно кривая  $I_2$  близка к случаю с емкостью СФ 2200 мкФ. Расчетом получено, что для полной компенсации реактивной мощности нагрузки при работе АД в номинальном режиме достаточна емкость СФ 2564 мкФ. То есть «перекомпенсация» реактивной мощности нагрузки посредством завышения емкости СФ приводит к заметному возрастанию  $I_1$ . При моделировании с емкостью СФ 8360 мкФ при малой нагрузке на валу АД без демпфирующих сопротивлений для  $f_1=40$  Гц и  $f_n=2,5$  кГц удельный ток через емкость составил 0,101 А/мкФ, тогда как при  $f_1=45$  Гц – уже 0,181 А/мкФ. Соответственно действующее значение выходного тока ПЧ в длительном режиме 972,3 и 1995,6 А. Таким образом, около  $f_1=42$  Гц происходит резкое возрастание  $I_1$  и превышение выходным током ПЧ значения  $I_{1\text{предел}}=1600$  А с дальнейшим нарастанием, на что ПЧ реагирует отключением по признаку «короткое замыкание на выходе». Кратное увеличение  $I_1$  в режиме малых нагрузок АД при емкости СФ 8360 мкФ по сравнению со случаем отсутствия емкости подтверждено испытаниями.



**Рис. 3.** Расчетный удельный действующий ток через емкость СФ и коэффициент гармонических составляющих тока  $I_d$  при  $f_1=50$  Гц и нагрузке на валу АД  $0,05P_{2н}$ . Кривые получены при включенных демпфирующих резисторах. При их отсутствии удельный ток через емкость выше в 1,3–1,4 раза. 1 – допустимый удельный ток 0,16 А/мкФ для конденсаторов емкостью 1000 мкФ; 2 – допустимый удельный ток 0,25 А/мкФ для конденсаторов емкостью 160 и 200 мкФ; 3 – расчетный удельный ток через емкость СФ; 4 –  $k_d$

Третье положение иллюстрируется конкретным примером: емкость фазы СФ 8360 мкФ [7], рассчитанная из условия работы при  $f_n=2,1$  кГц, практически была получена сочетанием конденсаторов с номиналами 1000, 200 и 160 мкФ. Каждый кон-

денсатор защищен плавким предохранителем. Предельные действующие значения токов длительного режима составляют: 40 А для 160 мкФ, 50 А для 200 мкФ и 160 А для 1000 мкФ. Соответственно длительно допустимый удельный ток на единицу емкости составляет для младших номиналов конденсаторов 0,25 А/мкФ, для старшего номинала 0,16 А/мкФ. Таким образом, если подключим, как рассмотрено на рис. 2, на фазу СФ 2200 мкФ, то по сумме токов через предохранители длительно допустимо 370 А на фазу, и следовало бы на этом основании по рис. 2 и 4 ожидать, что при  $f_1=50$  Гц,  $f_n=2,5$  кГц и нагрузке на валу АД более  $0,05P_{2н}$  конденсаторы по току в длительном режиме работы перегружены не будут. Но ток через параллельно соединенные конденсаторы распределяется прямо пропорционально их емкостям. Отсюда следует, что оценивать допустимость загрузки конденсаторов током при наличии параллельно подключенных старших и младших номиналов следует по величине 0,16 А/мкФ. Из рис. 4 видно, что лишь при мощности на валу АД свыше  $0,4P_{2н}$  имеем допустимую загрузку конденсаторов током в длительном режиме. В противном случае, так как расчетный удельный ток емкости превосходит допустимое значение 0,16 А/мкФ незначительно, будет наблюдаться срабатывание защиты (плавких вставок) в первую очередь конденсаторов номиналом 1000 мкФ по току перегрузки (по перегреву в длительном режиме). Это наблюдалось в ходе проведения пусконаладочных работ СФ на ВНС, когда отработывался длительный режим работы на  $f_1=50$  Гц при отсутствии нагрузки на валу АД и емкостях на фазу СФ 2200 и 2000 мкФ (срабатывание плавких вставок в течение 10–15 мин) или 1000 мкФ (срабатывание плавких вставок в течение 5 мин).

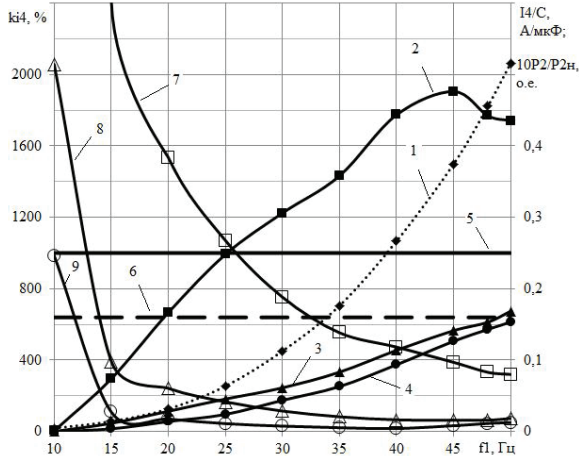


**Рис. 4.**  $I_d$  и удельный ток емкости в функции мощности на валу АД для случая ёмкости в фазе СФ 2200 мкФ,  $f_1=50$  Гц и  $f_n=2,5$  кГц: 1 –  $I_d$ ; 2 – наибольший допустимый ток длительного режима  $I_{d\text{предел}}=370$  А; 3 – действующий удельный ток емкости в длительном режиме; 4 – наибольший допустимый действующий удельный ток емкости в длительном режиме равный 0,16 А/мкФ

Из рис. 3 следует, что при мощности на валу АД  $0,05P_{2н}$ ,  $f_1=50$  Гц и  $f_n=2,5$  кГц имеем допустимую загрузку конденсаторов током в длительном режиме при емкости в фазе СФ не менее 7160 мкФ, если включены демпфирующие резисторы.

С принятыми токоограничивающими реакторами в индуктивной части выходного фильтра ПЧ выполнение им функций СФ возможно при величине емкости на фазу не менее 360 мкФ при  $f_n=2,5$  кГц. Для составления емкости 360 мкФ используются лишь конденсаторы номиналов 160 и 200 мкФ с большим допустимым удельным током. Но в этом случае величина расчетного удельного тока почти в два раза выше, чем 0,25 А/мкФ (рис. 3). Следует ожидать быстрого перегорания плавких вставок, защищающих конденсаторы, по пусковому току типа тока короткого замыкания. При проведении пусконаладочных работ СФ с емкостью 360 мкФ на фазу перегорание плавких вставок происходило уже в процессе частотного пуска ненагруженного АД при  $f_1=20-25$  Гц (приблизительно через 40 с после начала частотного разгона АД). Корпуса предохранителей даже не успевали нагреться.

На рис. 5 показаны расчетные графики удельных токов длительного режима емкостей СФ в функции частоты выходного напряжения ПЧ для трех значений ёмкости в фазе СФ при малых нагрузках на валу АД в условиях наличия в емкостной части СФ демпфирующих резисторов RA, RB и RC.

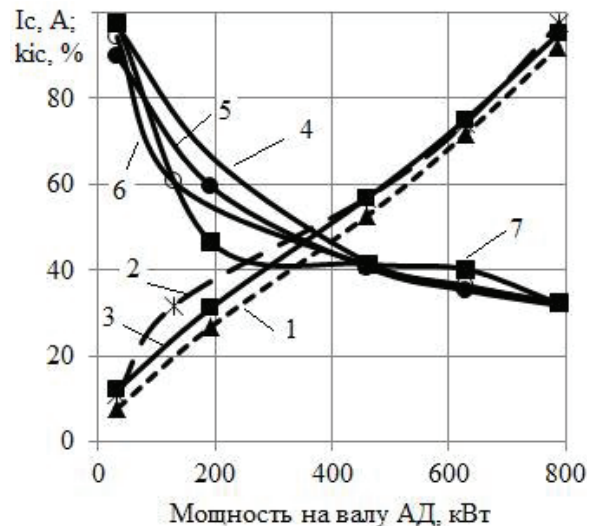


**Рис. 5.** Удельный ток емкости в длительном режиме и  $k_{14}$  в функции частоты выходного напряжения ПЧ для случаев ёмкости в фазе СФ 360, 2200 и 8360 мкФ при  $f_n=2,5$  кГц, малых нагрузках на валу АД и включенных демпфирующих резисторах: 1 –  $10P_2/P_{2н}$  (отношение мощности на валу АД к номинальной); 2 – удельный ток емкости при 360 мкФ; 3 – удельный ток емкости при 2200 мкФ; 4 – удельный ток емкости при 8360 мкФ; 5 – максимальный допустимый в длительном режиме удельный ток конденсаторов номиналов 160 и 200 мкФ; 6 – максимальный допустимый в длительном режиме удельный ток конденсаторов номинала 1000 мкФ; 7, 8, 9 –  $k_{14}$  при ёмкости 360, 2200 и 8360 мкФ соответственно

Из рис. 5 видно, что при емкости 8360 мкФ удельный ток емкости ниже предельного значения

длительного режима во всем диапазоне  $f_1$ . При 2200 мкФ удельный ток емкости ниже предельного значения до  $f_1=49$  Гц, а при 360 мкФ – только до частоты  $f_1=25$  Гц. Причем, при 360 мкФ наибольшая загрузка емкостей по току наблюдается при  $f_1=45$  Гц, а не при  $f_1=50$  Гц, как в двух других случаях. Во всех случаях наблюдается тенденция уменьшения  $k_{14}$  с ростом частоты. Но при 8360 мкФ  $k_{14}$  несколько возрастает после 40 Гц, а при 2200 мкФ – после 45 Гц.

Четвертое положение в части возникновения резонансов емкостей СФ с сетевой стороной привода невозможно ввиду односторонней проводимости диодов входного неуправляемого выпрямителя ПЧ. Как видно из рис. 6,  $I_c$ , потребляемый из сети электроприводом (ток обмотки высокого напряжения понижающего трансформатора), слабо зависит от наличия и параметров СФ. Следует констатировать некоторое возрастание  $I_c$  при наличии СФ по сравнению с его отсутствием (на 1–41 %, большие значения соответствуют меньшей нагрузке АД). Для сетевого тока  $k_{1c}$  также несколько меняется от емкости СФ (рис. 6).



**Рис. 6.** Сетевой ток электропривода при  $f_1=50$  Гц: 1 –  $I_c$  при  $f_n=2,5$  кГц, отсутствии СФ или при емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах; 2 –  $I_c$  при  $f_n=2,5$  кГц, емкости 8360 мкФ на фазу СФ без демпфирующих резисторов; 3 –  $I_c$  при  $f_n=1$  кГц, емкости 2200 мкФ на фазу СФ и включенных демпфирующих резисторах; 4 –  $k_{1c}$  при  $f_n=2,5$  кГц и отсутствии СФ; 5 –  $k_{1c}$  при  $f_n=1$  кГц, емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах; 6 –  $k_{1c}$  при  $f_n=2,5$  кГц, емкости 8360 мкФ на фазу без демпфирующих резисторов; 7 –  $k_{1c}$  при  $f_n=2,5$  кГц, емкости 2200 мкФ на фазу и включенных демпфирующих резисторах

Имеется возможность возникновения резонансных явлений между индуктивными элементами ПЧ и емкостями СФ, а также между емкостями СФ и индуктивностями нагрузки.

В [14] в п. 3.4 относительно СФ сказано: «LC-фильтр позволяет сформировать в двигателе близкую к синусоидальной форму напряжения. В ряде



случаев к LC-фильтру добавляют диссипативный элемент – резистор, включение которого исключает вероятность возникновения процессов ударного возбуждения вследствие циклического обмена энергии в контуре «емкость фильтра – индуктивность двигателя». С целью демпфирования возможных резонансных колебаний тока в контурах, содержащих емкости СФ, было принято решение подключить резисторы RA, RB и RC в линии питания емкостей (рис. 1). Такие технические решения используются зарубежными электротехническими фирмами [15, 16]. Были выбраны сопротивления по 0,013468 Ом, позволяющие в длительном режиме рассеивать до 8 кВт на фазу СФ. Компьютерное моделирование показало, что удовлетворить ограничению по рассеиваемой мощности на резисторах с учетом весьма сложного гармонического состава токов через них возможно лишь при емкости фазы СФ, не более 2360 мкФ. Температура сопротивлений при испытаниях без обдува составила 172 °С, что говорит о необходимости их принудительного охлаждения. На рис. 7 показаны расчетные энергетические характеристики СФ с емкостью 2200 мкФ на фазу при  $f_1=50$  Гц,  $f_n=2,5$  кГц и  $k_U=32,3$  % для линейного напряжения на входе СФ. В случае снижения  $f_n$  при прочих равных условиях энергетические характеристики СФ ухудшаются.

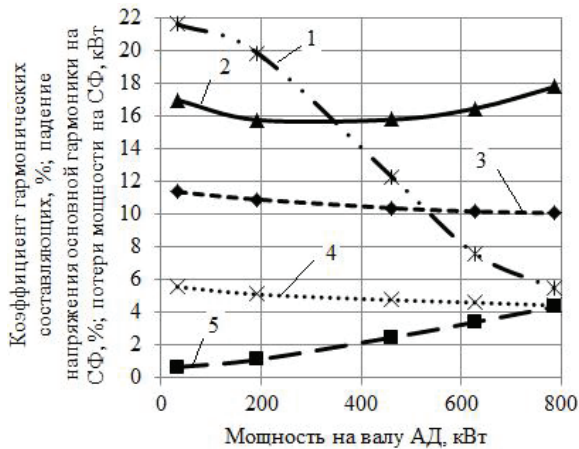


Рис. 7. Расчётные энергетические характеристики СФ: 1 –  $k_n$ ; 2 – суммарные потери в СФ; 3 –  $k_U$  суммарный коэффициент гармонических составляющих междуфазного напряжения на нагрузке; 4 – потери мощности на демпфирующем сопротивлении фазы; 5 – падение напряжения от основной гармоники на фазе СФ

Рис. 8 свидетельствует об эффективности воздействия СФ на гармонический состав тока. Наибольшей паразитной гармоникой тока  $I_2$  является 5-я.

По рис. 7 и 8 можно сделать заключение о вполне удовлетворительных характеристиках СФ при  $f_1=50$  Гц и  $f_n=2,5$  кГц, исключая чрезмерный удельный ток через емкость при малых нагрузках АД (рис. 3–5). Говоря иначе, такой СФ может эксплуатироваться при мощности на валу АД свыше  $0,4P_{2H}$ . Проводить пусконаладочные работы на приводе с таким СФ без нагрузки на валу или с ма-

лой нагрузкой в длительном режиме невозможно. Вполне возможна эксплуатация СФ во всем диапазоне нагрузок АД при  $f_1 < 49$  и  $f_n = 2,5$  кГц. При  $f_n = 1$  кГц эксплуатация СФ невозможна.

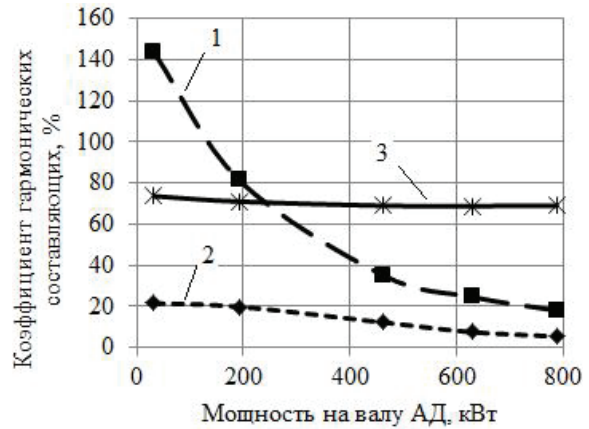


Рис. 8. Расчётные суммарные коэффициенты гармонических составляющих для токов СФ: 1 –  $k_n$ ; 2 –  $k_U$ ; 3 –  $k_U$

Позволив осуществлять уверенный безаварийный пуск привода, ввод демпфирующих резисторов не устранил полностью низкочастотных качаний тока (порядка единиц герц) на выходе ПЧ при некоторых частотах выходного напряжения. В ходе испытаний с емкостью СФ 2000 мкФ на фазу колебания действующего значения тока  $I_1$  составляли до 17 % от средней величины при  $f_1=50$  Гц и свыше 11 % при  $f_1=38$  Гц. Рост тока при разгоне отмечен примерно до  $f_1=30$  Гц. Свыше частоты 30 Гц следовал спад значений тока  $I_1$ . Так как на испытаниях темп набора частоты преобразователем был задан 50 Гц за 90 с, то явления пускового тока АД должны были бы уже закончиться ранее достижения частоты 30 Гц. Поэтому, возможно, имеют место резонансные явления амплитуд токов ПЧ и АД. В ходе анализа результатов компьютерного моделирования отмечено, что при мощности на валу АД  $0,05P_{2H}$  при различных значениях  $f_1$  имеют место колебания частоты вращения ротора с частотой примерно  $f_{кр}=5-7,25$  Гц (среднее арифметическое 6,125 Гц). Их наличие в результатах моделирования не связано с величиной или отсутствием емкости СФ. В условиях малой нагрузки в процессе колебаний частоты вращения ротора возможны периодические выходы АД в генераторный режим. Тот же период колебаний имеет амплитуда тока фазы АД  $I_2$  и амплитуда выходного тока ПЧ  $I_1$ . Также имеются колебания мощности, выделяемой на активных сопротивлениях реакторов и на демпфирующих резисторах, той же частоты, что и колебания частоты вращения ротора АД. Колебания мощностей наиболее заметны при  $f_1=25$  и 35 Гц. Соответственно частоты колебаний составляют около 5 и 6,67 Гц. Эти же частоты колебаний амплитуды зафиксированы в результатах моделирования сетевого тока привода. Возрастание сетевого тока в результате таких колебаний могло бы объяснить зафиксированные во время ис-



питаний единичные случаи срабатывания защиты понижающего трансформатора. Значения частоты выходного напряжения ПЧ, для которых в ходе испытаний и моделирования замечено возрастание амплитуды  $I_1$ , а именно: 12, 25, 27, 35, 38, 42, 47, 50 Гц, близки к числам, кратным  $f_{гр}$ .

В [17] указано на то, что при питании от высоковольтных ПЧ мощных АД насосных станций возможны явления возникновения автоколебаний тока и скорости вращения. Иными словами, возможны проявления резонансных явлений тока  $I_1$ . О наличии или отсутствии в схеме выходных фильтров ПЧ в [17] упоминаний нет. Основным критерием склонности АД к вхождению в резонанс в [17] называется величина коэффициента передачи магнитного потока между статором и ротором  $k \geq 0,95$

$$k = L_{\mu} / \sqrt{(L_{\mu} + L_{\sigma 1})(L_{\mu} + L'_{2})}. \quad (1)$$

Для АД ВНС составляющие выражения (1) имеют значения, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Значения составляющих выражения (1) [1, 4]

Главная индуктивность асинхронной машины $L_{\mu}$ , Гн	Индуктивность рассеяния фазы обмотки статора $L_{\sigma 1}$ , Гн	Индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, приведённая к фазе статора $L'_{2}$ , Гн	Коэффициент передачи магнитного потока между статором и ротором $k$ , о.е.
Асинхронный двигатель 630 кВт, 1500 об/мин, 6 кВ			
0,277214	0,01084367	0,01518114	0,955

Очевидно, что конкретный АД отвечает критерию склонности к вхождению в резонанс, так как рассчитанное  $k=0,955 > 0,95$ . Возможно, наличие емкостного накопителя энергии на клеммах нагрузки способствует усугублению проявлений этой склонности, так как на испытаниях при пусках привода без СФ заметных низкочастотных качаний тока  $I_1$  не зафиксировано.

Пятое положение отражено, например, в [13, 18], где установлено соответствие между номинальной мощностью АД на 0,4 кВ линейного напряжения с синхронной частотой вращения 1500 об/мин и максимальной реактивной мощностью компенсирующих конденсаторов, кВАр, подключаемых к клеммам двигателя, гарантирующей отсутствие самовозбуждения АД (табл. 2). Из табл. 3 следует, что емкости мощных СФ для работы при  $f_{н}=2$  кГц известных зарубежных фирм с запасом соответствуют требованиям табл. 2. Малая емкость в СФ достигается за счет увеличения индуктивности, что приводит в некоторых случаях к падению напряжения на индуктивности более 10 %. Тем не менее, [13, 18] не отрицают возможности использования емкостей больших, чем рекомендованные.

Возможным компромиссным решением по использованию СФ при двухтрансформаторной схеме питания высоковольтного АД от низковольтного ПЧ является установка высоковольтных кон-

денсаторов на клеммы обмотки высокого напряжения повышающего трансформатора, индуктивности рассеяния которого в этом случае выполняют функцию индуктивности СФ.

Таблица 2. Рекомендованные соответствия между номинальной мощностью АД и максимальной реактивной мощностью конденсаторов

Номинальная мощность АД, кВт	Максимальная реактивная мощность конденсаторов, кВАр	C, мкФ (на фазу) при подключении по схеме треугольник на напряжение 0,4 кВ
22	8	53
30	10	66
37	11	73
45	13	86
55	17	113
75	22	146
90	25	166
110	29	192
132	36	239
160	41	272
200	47	312
250	57	378
280	63	418
355	76	504
400	82	544
450	93	617
Последующие значения получены экстраполяцией		
500	102	675
630	123	816
800	150	994

Таблица 3. Характеристики мощных синус-фильтров фирм Danfoss [19] и Schaffner [20] на линейное напряжение 0,4 кВ

Номинальная мощность АД, кВт	C, мкФ (на фазу) при подключении по схеме треугольник	L, мГн	Резонансная частота СФ $f_r$ , Гц	Несущая частота ШИМ ПЧ $f_{п}$ , Гц	$f_{н}/f_p$	Падение напряжения на частоте 50 Гц на индуктивности СФ в % от 380 В	Выходной ток ПЧ, А
250	94	0,11	903,6	3000	3,3	4,4	480
400	165	0,2	505,8	2000	4,0	12,4	750
450	188	0,11	639,0	2000	3,1	8,0	880
500	188	0,11	639,0	2000	3,1	8,0	880
560	282	0,075	631,8	2000	3,2	7,4	1200
630	282	0,075	631,8	2000	3,2	7,4	1200
800	330	0,1	505,8	2000	4,0	12,4	1500

Достоинства такого решения: ёмкость СФ получается небольшой и формируется единственным конденсатором на фазу, удовлетворяются рекомендации табл. 2 (если считать, что максимальная реактивная мощность конденсаторов, которую можно присоединить к клеммам АД без риска развития самовозбуждения, не зависит от напряжения). Недостатком будет отсутствие защиты посредством СФ повышающего трансформатора. Для ВНС в ряде случаев такой вариант приемлем, так как явление озонирования требуется исключить в помеще-

ниях, где находятся люди. АД с насосными агрегатами устанавливаются в машинном зале, где работает персонал. Трансформаторы устанавливаются в отдельных боксах, куда доступ людей ограничен.

В рассматриваемом случае с высоковольтным АД мощностью 630 кВт могут быть использованы высоковольтные конденсаторы КЭК1-6,3-75, подключаемые по схеме звезда. Ёмкость конденсатора 6 мкФ. Подключается каждый конденсатор на номинальное фазное напряжение  $U_{\text{сфн}}=6300/\sqrt{3}=3467\text{В}$ . Номинальный ток конденсатора рассчитаем по номинальной реактивной мощности и номинальному напряжению:  $I_{\text{сн}}=Q_{\text{сн}}/U_{\text{сн}}=75000/6300=11,905\text{ А}$ . Конденсатор допускает перегрузку по току на 30 %. При номинальных токе и фазном напряжении реактивная мощность трёх фаз конденсаторов СФ составит  $Q_{\text{сф}}=3U_{\text{сфн}}I_{\text{сн}}=3\cdot 3467\cdot 11,905=123823,9\text{ Вар}$ , то есть 123,8 кВар, что незначительно больше предельного значения (123 кВар) из табл. 2. Характер зависимости тока через конденсатор от нагрузки на валу АД такой же, как и при низковольтных конденсаторах: при неизменной частоте напряжения с ростом нагрузки ток через конденсаторы СФ снижается. То есть ток конденсаторов в режиме холостого хода будет наибольшим. Моделированием получено при нагрузке АД  $0,05P_{\text{дн}}$  действующее значение тока через конденсатор СФ в установившемся режиме 11,439 А, что ниже номинального тока. Реакторы РТСТ в этом случае практически не являются значимой частью индуктивности СФ – в основном её функцию выполняют индуктивности рассеяния обмоток трансформатора ТСЗГЛФ 1250/10 УЗ, используемого в качестве повышающего, для которого в первом приближении сумма индуктивностей рассеяния обмоток  $L_{\sigma 1}+L_{\sigma 2}'=2\cdot 0,0032=0,0072\text{ Гн}$ . Тогда  $f_{\text{н}}/f_{\text{р}}=2500/765,7=3,265$ .

#### Выводы

1. При использовании емкостей СФ, составленных из параллельно соединенных конденсаторов с различными характеристиками, следует принимать в качестве ограничения по току наименьшее из возможных для различных конденсаторов значение удельного тока через емкость.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустоветов М.Ю., Солтус К.П., Синявский И.В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. – Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 209 с. URL: [http://rgups.ru/books/komputernoe\\_modelirovanie\\_asinhronnyh\\_dvigatellei\\_i\\_transformatorov.pdf](http://rgups.ru/books/komputernoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigatellei_i_transformatorov.pdf) (дата обращения: 06.09.2013).
2. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.
3. Черный А.П., Полищук П.И., Воробейчик О.С. Анализ динамических характеристик частотно-регулируемого электропривода с фильтром на выходе инвертора // Електротехнічні і

2. При использовании емкостей СФ, составленных из определённого набора параллельно соединенных конденсаторов с различными номиналами, следует предусматривать возможность использования у потребителя разных сочетаний номиналов конденсаторов, позволяющих производить настройку ёмкости СФ под конкретные условия эксплуатации. Следует предусматривать возможность эксплуатации СФ как без, так и с демпфирующими резисторами в емкостной части.
3. Конденсаторы СФ наиболее нагружены током в режиме холостого хода нагрузки. СФ должен обеспечивать возможность работы в длительном режиме при реальном холостом ходе нагрузки, например, АД, во всем диапазоне значений выходного напряжения и частоты ПЧ. Это весьма важно для проведения пусконаладочных работ.
4. В СФ не следует использовать емкость большую, чем пригодная для обеспечения полной компенсации реактивной мощности нагрузки. Нарушение этого правила ведет к неоправданному увеличению выходного тока ПЧ и тока через емкости СФ.
5. Метод расчета действующего значения тока через емкость СФ должен обеспечивать корректный учет вклада широкого спектра высших временных гармоник. Целесообразно для расчета действующего значения тока через емкость проводить компьютерное моделирование установившихся режимов работы привода, а для выявления максимальных мгновенных величин тока – динамических режимов. Расчет действующего значения тока через емкость СФ методом, описанным в [21], по результатам моделирования динамических режимов привода может приводить к заниженным значениям.
6. Снижать удельный ток через емкость СФ за счет увеличения сопротивления демпфирующих резисторов нецелесообразно. Например, двукратное увеличение сопротивления приводит к возрастанию на нем потерь на 83 % при снижении удельного тока через емкость СФ лишь на 4 %.

енергозберігаючі системи, 2007. – Випуск 2. – С. 5–11. URL: [http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007\\_02/EES\\_2\\_2007\\_PDF/5.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007_02/EES_2_2007_PDF/5.pdf) (дата обращения: 14.09.2013).

4. Пустоветов М.Ю. Приближённое определение параметров асинхронных двигателей / Технологія-2013: матеріали міжнар.наук.-техн. конф. – Северодонецк, 26–27 квіт. 2013. – Северодонецк: Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2013. – Ч. II. Укл. Тарасов В.Ю. – С. 84–86. URL: [http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech\\_2013\\_sborn\\_2.pdf](http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech_2013_sborn_2.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
5. Пустоветов М.Ю. Характеристики L-CR синус-фильтра для мощного частотно-регулируемого электропривода // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников VI Междунар. научно-практ. конф. – Белово, 17–18 мая 2013. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово; Велико Търново, Бол-

- гария: Изд-во университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», 2013. – Ч. 2. – С. 292–295. URL: [conference.kemsu.ru/conf/bfkuzgtu2013/index.htm](http://conference.kemsu.ru/conf/bfkuzgtu2013/index.htm) (дата обращения: 11.09.2013).
6. Пустоветов М.Ю. О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями // *Электричество*. – 2013. – № 5 – С. 41–44.
  7. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров в частотно-регулируемом электроприводе // *Вестник ДГТУ*. – 2012. – Т. 12. – № 3 (64). – С. 56–64. URL: [http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6\\_PUBLICATION:68640](http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6_PUBLICATION:68640) (дата обращения: 28.08.2013).
  8. Пустоветов М.Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусного фильтра для преобразователя собственных нужд электровоза // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2012. – № 5–6. – С. 13–15.
  9. Пустоветов М.Ю. Математическая и компьютерная модели асинхронного двигателя в трёхфазной системе координат // *Электричество*. – 2013. – № 7 – С. 41–45.
  10. Пустоветов М.Ю. Выбор математической модели асинхронного двигателя в трёхфазных заторможенных координатах // *Вестник РГУПС*. – 2012. – № 4 (48). – С. 136–144. URL: <http://elibrary.ru/download/73081796.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
  11. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трёхфазного трансформатора // *Известия ТПУ*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 97–100. URL: <http://elibrary.ru/download/50974557.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
  12. Пустоветов М.Ю. О прямом пуске асинхронного двигателя с двухступенчатой компенсацией реактивной мощности в составе вспомогательного привода электровоза // *Известия Транссиба*. – 2012. – № 3 (11). – С. 83–88. URL: [http://om-gups.ru/structure/transsib/2012/2012\\_03.pdf](http://om-gups.ru/structure/transsib/2012/2012_03.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
  13. Руководство по устройству электроустановок 2009. Технические решения «Шнейдер Электрик». URL: [http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical\\_Guide\\_2009.pdf](http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical_Guide_2009.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
  14. Хачатурян В.А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 64 с. URL: [zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc](http://zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc) (дата обращения: 28.08.2013).
  15. Type SF Sinewave Output Filters. URL: <http://www.powe-rohm.com/pdfs/HFCAT00.pdf> (дата обращения: 11.09.2013).
  16. Trans-Coil. Inc. Performance and Protection for Drives. Motor Guard TM Sine Wave Filter. Installation, Operation and Maintenance Manual. URL: [www.clrwtr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf](http://www.clrwtr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
  17. Чепкунов Р.А. Исследование электромеханических автоколебаний в асинхронном электроприводе на низких частотах // *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. – 2008. – Вип. 4 (51). – Ч. 2. – С. 17–20. URL: <http://www.kdu.edu.ua/statsti/2008-4-2/17.pdf> (дата обращения: 28.08.2013).
  18. EPCOS. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Product Profile 2009. URL: [http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC\\_Katalog2009.pdf](http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC_Katalog2009.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
  19. Danfoss. Output Filters Design Guide. URL: [www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EAO-849044873F59/0/Output\\_Filters\\_Design\\_Guide.pdf](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EAO-849044873F59/0/Output_Filters_Design_Guide.pdf) (дата обращения: 28.08.2013).
  20. LC Sine Wave Filter for Motor Drives. Output Filters FN5040 / FN5045. Schaffner. URL: <http://www.schaffner.com/en/products/datasheet-low-res/product/fn-5040-fn-5045-lc-sine-wave-filter-for-motor-drives.html> (дата обращения: 28.08.2013).
  21. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. – М.: СОЛЮН-Пресс, 2005. – 200 с.

Поступила 15.09.2013 г.

UDC 62-83 (075.8)

## EXPERIENCE IN DEVELOPING SINE-WAVE FILTER FOR POWER CIRCUIT OF VVVF-DRIVE WITH INDUCTION MOTOR

Mikhail Yu. Pustovetov,

Cand. Sc., Rostov State Transport University, Russia, 344038, Rostov-on-Don, Narodnogo Opolcheniya sq., 2. E-mail: [mgsn2006@rambler.ru](mailto:mgsn2006@rambler.ru)

*The relevance of the work reflects the increased use in domestic practice of variable frequency electric drive additional options, which include sine-wave filter; the demand for development of sine-wave filters based on domestic components.*

**The main aim of the study:** *to develop guidelines for choosing the parameters of the sine-wave filters and the correct selection of the elements in the current; to consider the phenomena occurring when the capacity turn on to terminals of the load with induction motor, such as: reactive power compensation and overcompensation, self-excitation.*

**The methods used in the study:** *test on a real process plant; computer simulation of an electromechanical system with a semiconductor converter based on a combination of circuit and operational principles for preparing the model.*

**The results:** *the author describes some of the results of experience in the design and testing of the sine-wave filter for high-power VVVF drive with high voltage induction motor with scalar control. The paper introduces the comparative results of the computer simulation of processes at different sets of the sine-wave filter and converter parameters. Some recommendations for sine-wave filter design are suggested.*

### Key words:

*Frequency converter, pulse-width modulation of voltage, sine-wave filter, induction motor, capacitance, reactive power, self-excitation, current.*



## REFERENCES

- Pustovetov M.Yu., Soltus K.P., Sinyavskiy I.V. *Kompyuternoe modelirovanie asinkhronnykh dvigateley i transformatorov. Privery vzaimodeystviya s silovymi elektronnyimi preobrazovatelyami* [Computer modeling of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 209 p. Available at: [http://rgups.ru/books/kompyuternoe\\_modelirovanie\\_asinhronnyh\\_dvigateli\\_i\\_transformatorov.pdf](http://rgups.ru/books/kompyuternoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigateli_i_transformatorov.pdf) (accessed 06 September 2013).
- GOST R 54149–2010. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard R 54149–2010. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards of electrical energy in power systems of general purpose]. Moscow, Standartinform, 2012. 20 p.
- Cherny A.P., Polishchuk P.I., Vorobeychik O.S. Analiz dinamicheskikh kharakteristik chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s filtrom na vykhode invertora [Analysis of dynamic characteristics of the variable frequency electric drive with inverter output filter]. *Elektrotehnichni i energoberigajuchi sistemi – Electrical and Energy-Saving Systems*, 2007, no. 2, pp. 5–11. Available at: [http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007\\_02/EES\\_2\\_2007\\_PDF/5.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/Ees/2007_02/EES_2_2007_PDF/5.pdf) (accessed 14 September 2013).
- Pustovetov M.Yu. Priblizhynnoe opredelenie parametrov asinkhronnykh dvigateley [Approximate determination of the parameters of induction motors]. *Tekhnologiya–2013: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technology 2013. Proc. of International Research Conference]. Severodonetsk, April 26–27 2013. Part II, pp. 84–86. Available at: [http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech\\_2013\\_sborn\\_2.pdf](http://www.sti.lg.ua/attachments/tech2013/tech_2013_sborn_2.pdf) (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Kharakteristiki L-CR sinus-filtra dlya moshchnogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Characteristics of L-CR sine-wave filter for a powerful variable frequency drive]. *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii. Sb. statey uchastnikov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in technology and education: a collection of articles by participants VI Intern. scientific and practical. conf.]. Belovo, 17–18 May 2013. P. 2. Belovo, Publisher of branch of Kuznetsk State Technical University; Veliko Tarnovo, Bulgaria, Publishing House of the University «St. Cyril and Methodius», 2013, pp. 292–295. Available at: [conference.kemsu.ru/conf/bfkuztu2013/index.htm](http://conference.kemsu.ru/conf/bfkuztu2013/index.htm) (accessed 11 September 2013).
- Pustovetov M.Yu. O parametrah filtrov dlya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s asinkhronnymi dvigatelyami [About filter parameters for VVVF-drive with induction motor]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no. 5, pp. 41–44.
- Pustovetov M.Yu. Raschet parametrov i kompyuternoe modelirovanie sinusnykh filtrov v chastotno-reguliruemom elektroprivode [VVVF-drive sinusoidal filters parameters calculation and computer modeling]. *Vestnik DGTU – Herald of Don State Technical University*, 2012, vol. 12, no. 3 (64), pp. 56–64. Available at: [http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6\\_PUBLICATION:68640](http://science.donstu.ru/pls/apex/f?p=359:6:3137482518447614::NO::P6_PUBLICATION:68640) (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Raschet parametrov i kompyuternoe modelirovanie sinusnogo filtra dlya preobrazovatelya sobstvennykh nuzhd elektrovoza [Electric locomotive's auxiliary drive sine-wave filter parameters calculation and computer modeling]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2012, no. 5–6, pp. 13–15.
- Pustovetov M.Yu. Matematicheskaya i kompyuternaya modeli asinkhronnogo dvigatelya v trekhfaznoy sisteme koordinat [Induction motor mathematical and computer model in the 3-phase stator reference frame]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no. 7, pp. 41–45.
- Pustovetov M.Yu. Vybore matematicheskoy modeli asinkhronnogo dvigatelya v trekhfaznykh zatormozhennykh koordinatakh [The choice of induction motor mathematical model in the 3-phase stator reference frame]. *Vestnik RGUPS – Herald of Rostov State University of Transport Communications*, 2012, no. 4 (48), pp. 136–144. Available at: <http://elibrary.ru/download/73081796.pdf> (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. Matematicheskaya model trekhfaznogo transformatora [3-phase transformer mathematical model]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 97–100. Available at: <http://elibrary.ru/download/50974557.pdf> (accessed 28 August 2013).
- Pustovetov M.Yu. O pryamom puske asinkhronnogo dvigatelya s dvukhstuppenchatoy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti v sostave vspomogatelnogo privoda elektrovoza [About direct start of induction motor with two-step reactive power compensation with an auxiliary electric drive of electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba – Proceedings of the Trans-Siberian Railway*, 2012, no. 3 (11), pp. 83–88. Available at: [http://omgups.ru/structure/transsib/2012/2012\\_03.pdf](http://omgups.ru/structure/transsib/2012/2012_03.pdf) (accessed 28 August 2013).
- Rukovodstvo po ustroystvu elektroustanovok 2009. Tekhnicheskie resheniya «Schneider-Electric»* [Electrical installation guide 2009. Technical solutions of «Schneider Electric»]. Available at: [http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical\\_Guide\\_2009.pdf](http://www.schneider-electric.ru/documents/customers/designers/d-web-advanced/Electrical_Guide_2009.pdf) (accessed 28 August 2013).
- Hachaturyan V.A. *Upravlenie elektrosnabzheniem neftepererabatyvayushchikh predpriyatii v usloviyakh massovogo primeneniya reguliruemogo elektroprivoda* [Managing electricity refineries at mass application controlled electric drives]. St. Petersburg, Publisher of the St. Petersburg State Technical University, 2001. 64 p. Available at: [zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc](http://zistons.ru/chrp/problems/hachaturyan.doc) (accessed 28 August 2013).
- Type SF Sinewave Output Filters*. Available at: <http://www.powerohm.com/pdfs/HFCAT00.pdf> (accessed 11 September 2013).
- Trans-Coil. Inc. Performance and Protection for Drives. Motor Guard TM Sine Wave Filter. Installation, Operation and Maintenance Manual*. Available at: [www.clrwr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf](http://www.clrwr.com/PDF/TCI-TRANS-COIL/TCI-KMG-User-Manual.pdf) (accessed 28 August 2013).
- Chepkunov R.A. Issledovanie elektromekhanicheskikh avtokolebaniy v asinkhronnom elektroprivode na nizkikh chastotakh [Study of electromechanical oscillations in an induction motor based electric drive at low frequencies]. *Visnik KDPU imeni Mihayla Ostrogradskogo – Herald of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2008, no. 4 (51), P. 2, pp. 17–20. Available at: <http://www.kdu.edu.ua/statti/2008-4-2/17.pdf> (accessed 28 August 2013).
- EPCOS. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Product Profile 2009*. Available at: [http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC\\_Katalog2009.pdf](http://biakom.com/hfuhf/production/passive/EPCOS/PFC_Katalog2009.pdf) (accessed 28 August 2013).
- Danfoss. Output Filters Design Guide*. Available at: [www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EA0-849044873F59/0/Output\\_Filters\\_Design\\_Guide.pdf](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/27F81E1-3779-4406-8EA0-849044873F59/0/Output_Filters_Design_Guide.pdf) (accessed 28 August 2013).
- LC Sine Wave Filter for Motor Drives. Output Filters FN5040 / FN5045*. Schaffner. Available at: <http://www.schaffner.com/en/products/datasheet-low-res/product/fn-5040-fn-5045-lc-sine-wave-filter-for-motor-drives.html> (accessed 28 August 2013).
- Bolotovskiy Yu.I., Tanazly G.I. *OrCAD. Modelirovanie. «Povarennaya» kniga* [Simulation. «Cookbook»]. Moscow, SOLON-Press, 2005. 200 p.



УДК621.314.2:632

## ДВУХФАЗНЫЙ ПОВЫШАЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МЯГКОЙ КОММУТАЦИЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**Диксон Роберт Кристофер,**

аспирант Томского университета систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; Специалист по энергетике зоны  
Карибского моря, Ямайка, Кингстон 5, Доменика Драйв, 25,  
E-mail: dixon\_robert@mail.ru

**Дементьев Юрий Николаевич,**

PhD, канд. техн. наук, заведующий кафедрой электропривода  
и электрооборудования Энергетического института ТПУ,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: dementiev@mail2000.ru

**Михальченко Геннадий Яковлевич,**

д-р техн. наук, профессор кафедры промышленной электроники, директор  
НИИ промышленной электроники Томского университета систем  
управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
E-mail: kpe-tusur@yandex.ru

**Михальченко Сергей Геннадьевич,**

д-р техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники  
Томского университета систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: msg@ie.tusur.ru

**Семенов Сергей Михайлович,**

ст. преподаватель кафедры электропривода и электрооборудования  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
E-mail: epeo@enin.tpu.ru

*Актуальность работы определяется необходимостью повышения энергоэффективности и надежности полупроводниковых преобразователей за счет уменьшения динамических потерь переключения и снижения внутренних запасов энергии для широкого применения в бытовой и промышленной технике.*

**Цель исследования:** разработка способа мягкой коммутации транзисторов двухфазных преобразователей повышающего типа с использованием дроссельного коммутирующего элемента, позволяющего повысить технико-экономические показатели системы за счет снижения динамических потерь.

**Методы исследования:** Обзор литературных и патентных источников по тематике, сравнительный анализ имеющихся данных. Имитационное моделирование электромагнитных процессов в программной среде SwCAD с использованием коммутационно-разрывных функций. Для получения значений вектора переменных состояний использовался метод Ньютона-Рафсона, обладающий быстрой сходимостью и степенью точности получаемых дискретных значений.

**Результаты:** предложенная система регулирования напряжения на основе двухфазного повышающего преобразователя с мягкой коммутацией транзисторов обладает достаточной надежностью и сроком службы, позволяет получить высокий КПД даже при низких напряжениях источника питания.

### **Ключевые слова:**

Переключение при нулевом напряжении, переключение при нулевом токе, двухфазный повышающий преобразователь, частотно-импульсная модуляция, потери переключения, явления бифуркации, хаотические режимы, функционирование стабилизатора напряжения.

Исторически силовая транзисторная электроника получила свое развитие в низковольтных системах электропитания космической техники, где относительно невысокие пиковые значения мощности переключения в инверторных или «чопперных» статических преобразователях существенно не сказывались на сроках службы полупроводниковых элементов, электромагнитной совместимости преобразователя и нагрузки.

Однако с ростом коммутируемых напряжений, быстродействия транзисторов и диодов возникли следующие проблемы:

- резкий рост импульсных составляющих процесса переключения в питающие сети и нагрузку, выход из строя полупроводниковых преобразователей (ПП), снижение живучести из-за жесткой коммутации высоковольтных транзисторов преобразователя;

- внезапные отказы полупроводниковых преобразователей, связанные с динамической неустойчивостью режимов функционирования преобразователей из-за роста быстродействия.

Использование мягкой коммутации транзисторов в резонансных и квазирезонансных структурах преобразователей (ПНТ/ПНН) позволяет частично устранить вышеуказанные проблемы [1]. Однако наличие резонансных контуров предполагает применение в источниках питания частотной импульсной модуляции (ЧИМ), что ограничивает диапазон регулирования токов и напряжений, с одной стороны, и повышает требования к фильтрам радиопомех, с другой стороны. Кроме того, возрастают внутренние запасы энергии резонансных контуров, высвобождение которой во внешних режимах функционирования сопровождается внезапными отказами, увеличиваются и статические потери в приборах за счет перетоков реактивной энергии. Лучшее на сегодняшний день схемотехническое решение реализации мягкой коммутации возможно в фазосдвигаемых однофазных инверторах напряжения [2, 3].

В непосредственных преобразователях понижающего, повышающего и инвертирующего типов обеспечение мягкой коммутации связано с введением дополнительных реактивных элементов, преимущественно емкостных. В статье рассматривается один из возможных способов реализации мягкой коммутации в многофазных преобразователях повышающего типа с индуктивными (дроссельными) элементами и анализируются варианты улучшения его динамических свойств.

#### Статические режимы работы двухфазного повышающего преобразователя

На рис. 1 представлена функционально-принципиальная схема двухфазного повышающего преобразователя (ДПП), а на рис. 2 – временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие основные принципы мягкой коммутации МДП-транзисторов.

В установленном режиме работы преобразователя между моментами переключения транзисторов VT1 и VT2 вводится регулируемая пауза, минимальное значение которой фиксировано. В начальный момент времени (рис. 2) в проводящем состоянии находятся транзистор VT2 и диод VD1, при этом ток в индуктивности L2 нарастает, а в индуктивности L1 спадает, отдавая накопленную на предыдущем интервале энергию в нагрузку R<sub>н</sub>. Нарастают также токи  $i_{VT2}$  и  $i_{L3}$  в транзисторе VT2 и коммутирующей индуктивности L3. В момент времени, когда ток  $i_{L3}$  сравняется с током  $i_{L1}$ , запирается диод VD1 и начинается процесс разряда выходной емкости непроводящего транзистора VT1 током коммутирующей индуктивности L3 через открытый транзистор VT2. Напряжение на емкости C1 изменяет полярность, открывается обратный диод транзистора VT1 и ток коммутирующей индуктивности протекает по короткозамкну-

тому контуру до тех пор, пока не включится транзистор VT1. При этом открывается диод VD2 выпрямителя, индуктивность L2 разряжается на нагрузку, полярность напряжения на коммутирующем дросселе изменяется на противоположную и индуктивность L3 перезаряжается. Далее процесс повторяется.

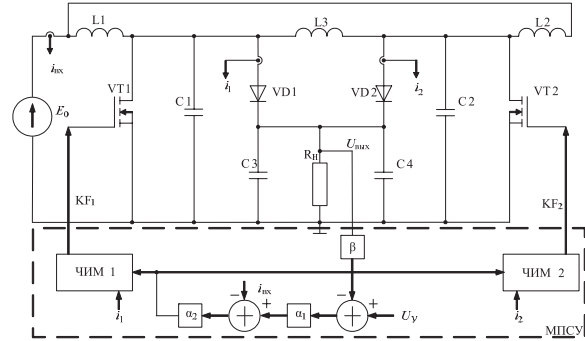


Рис. 1. Функционально-принципиальная схема ДПП

Таким образом, основные отличия рассматриваемой коммутации транзисторов от известных в статическом режиме сводятся к следующему:

- к моменту включения противотактных транзисторов VT1 и VT2 потенциалы их стока спадают до нуля и, сразу после включения, через обратные встроенные диоды VD1 и VD2 еще протекает отрицательный ток в направлении исток–сток, при этом в момент включения динамическая мощность потерь на кристалле транзистора равна нулю;

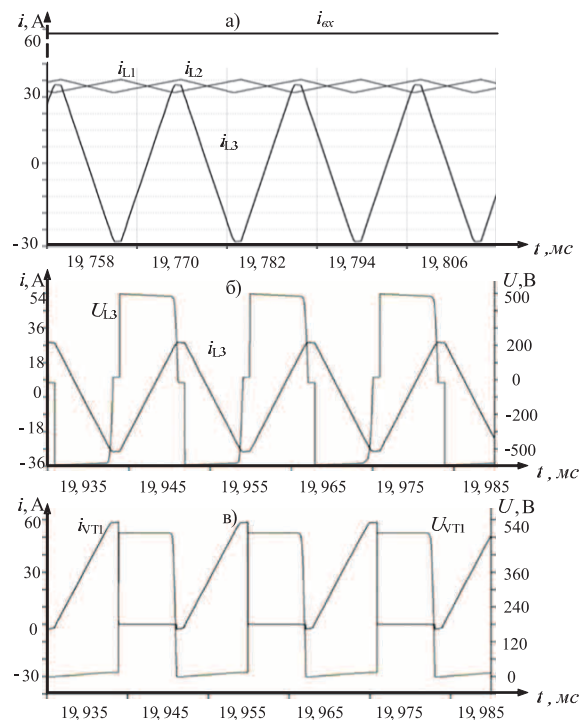


Рис. 2. Временные диаграммы ДПП: а) токи индуктивностей  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$  и ток  $i_{ex}$ ; б) ток  $i_{L3}$  и напряжение  $U_{L3}$  коммутирующей индуктивности L3; в) напряжение сток–исток транзистора  $U_{VT1}$  и его ток стока  $i_{VT1}$

- динамическая мощность выключения транзисторов находится на уровне статической рассеиваемой мощности;
- энергия, запасаемая в индуктивных элементах преобразователя, во внештатных режимах ДПП рассеивается нагрузкой;
- электромагнитная совместимость преобразователя с источником питания улучшается, поскольку ток  $i_{\text{вх}}$  равен сумме токов обеих индуктивностей  $i_{L1}, i_{L2}$ , пульсации которых изменяются в противофазе (рис. 2, а);
- аналогично ток нагрузки  $i_{\text{рн}}$  представляет собой сумму токов двух диодов VD1, VD2, что определяет частоту и величину пульсаций тока выходного фильтра С3, С4;
- коммутирующая индуктивность L3 переменного тока определяет противофазное изменение переменной составляющей токов дросселей каждой фазы преобразователя и строгое равенство постоянных составляющих, т. е. придает ему «естественные» свойства равномерного распределения этих токов.

**Анализ динамических режимов функционирования замкнутой системы стабилизации напряжения**

При построении функционально-принципиальной схемы ДПП (рис. 1) были приняты следующие допущения:

- источник постоянного напряжения  $E_0$  является идеальным;
- импульсный преобразователь выполнен на идеальных ключах с обратными диодами, время переключения которых равно нулю;
- паразитные емкости транзисторов учитываются емкостями С1, С2;
- элементы R, L, C линейны;
- корректирующие устройства  $\alpha_1, \alpha_2$  выполнены на базе идеальных элементов и представлены пропорциональными регуляторами.

Отрицательная обратная связь обеспечивается датчиками тока  $i_{\text{вх}}, i_1, i_2$ , напряжения  $U_{\text{вых}}$  и микропроцессорной схемой управления (МПСУ). Схема управления выполнена двухконтурной двухфазной и включает источник задающего сигнала  $U_\gamma$ , два элемента сравнения, два корректирующих устройства с коэффициентами усиления  $\alpha_1, \alpha_2$  и два частотно-импульсных модулятора (ЧИМ1, ЧИМ2). Сигналы управления транзисторами обозначены коммутационно-разрывными функциями  $KF_1$  и  $KF_2$ .

Преобразователи повышающего типа рассматриваются во многих работах [3–10], причем в большинстве случаев используются методы усреднения (линеаризации) вектора переменных состояния системы нелинейных дифференциальных уравнений. Используя данные методы, не представляется возможным учитывать множественность решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих режимы функционирования замкнутой САУ: периодические, квазипериодические и хаотические. В работе [10] исследуется ди-

намика классической структуры преобразователя повышающего типа с позиций бифуркационного анализа, где установлена закономерность хаотизации динамики тока входной индуктивности  $i_L=f(\alpha_2)$  через процесс «квазижесткого» удвоения периода, как показано на рис. 3, здесь  $\alpha_2$  – коэффициент усиления регулятора контура тока.

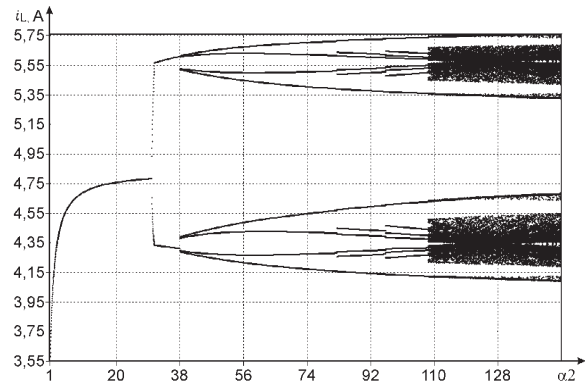


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма эволюции динамики однофазного ДПП

Для построения численно-аналитической модели динамики ДПП необходимо выполнить следующие условия:

1. Решение исходной системы уравнений записывается в аналитическом виде для каждого участка постоянства структуры силовой цепи.
2. Количество промежуточных задач (например, поиск момента изменения структуры), требующих применения численных методов, должно быть минимальным.
3. При использовании численных методов для определения моментов коммутации необходимо сформулировать требования к точности расчета числовых рядов.

**Результаты имитационного моделирования в среде SwCAD**

Для получения значений вектора переменных состояний использовался численно-аналитический метод, суть которого заключается в нахождении точного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих схему замещения на участках линейности структуры (постоянства коммутационных функций), который требует вычисления моментов коммутации, которые определялись численно на каждом тактовом интервале.

С помощью имитационной модели в SwCAD исследован алгоритм ЧИМ с мягкой коммутацией транзисторов ДПП. Сигналы управления транзисторами VT1, VT2 по закону ЧИМ представляют собой коммутационные функции  $KF_1(t), KF_2(t)$ . Коммутационные функции диодов VD1, VD2 находятся в противофазе:

$$KF_{VD2}(t)=1-KF_1(t), KF_{VD1}(t)=1-KF_2(t).$$

Причем сигналы  $KF_1, KF_2, KF_{VD1}, KF_{VD2}$  однозначно определяют режимы работы ДПП: как детерминированные режимы работы преобразовате-

ля, так и недетерминированные сигналы – из приведенных на рис. 4 зон бифуркации и хаоса.

Моделирование осуществлялось при следующих параметрах схемы ДПП:  $U_y=0,55$  В,  $L_1=L_2=450$  мкГн,  $L_k=35$  мкГн,  $C_n=20$  мкФ,  $\alpha_1=10$ ,  $R_L=0,2$  Ом,  $\beta=0,0025$ . Построение бифуркационных диаграмм проводилось при следующих диапазонах варьируемых величин ЭДС  $E_0=10..250$  В и коэффициентов усиления сигнала обратной связи  $\alpha_2=1...250$ .

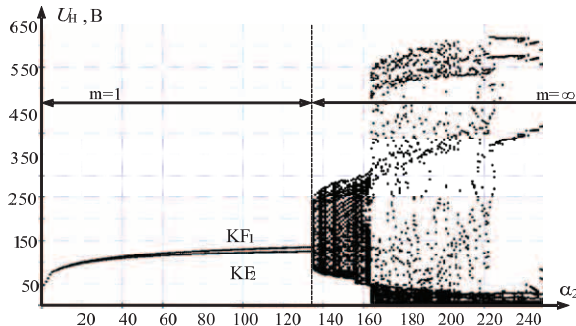


Рис. 4. Зависимости выходного напряжения  $U_n$  от коэффициента усиления сигнала обратной связи  $\alpha_2$  при  $U_y=0,55$  В и  $E_0=40$  В

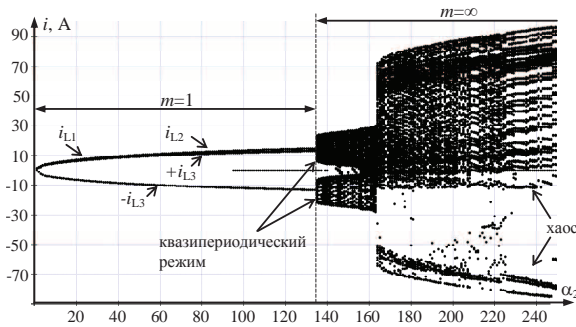


Рис. 5. Бифуркационная диаграмма токов дросселей с зоной устойчивости одноциклового режима ДПП при  $1 < \alpha_2 < 135$

На рис. 4, 5 приведены бифуркационные диаграммы, иллюстрирующие зоны устойчивых и неустойчивых состояний ДПП в плоскости параметров  $U_{\text{вых}}=f(\alpha_2)$ . Можно видеть, что вариант потери устойчивости стабильного одноциклового режима ( $m=1$ ), в отличие от бифуркации удвоения периода однотактного преобразователя (рис. 3), сопровождается бифуркацией Неймарка–Сакера при  $\alpha_2=135$ , с последующим «квазистремлением» возникновением хаотических движений при  $\alpha_2 > 164$ . Если квазипериодические режимы функционирования сопровождаются амплитудой колебаний то-

ков и напряжений, в десятки раз превышающих таковые одноциклового режима, то в области хаотических колебаний – в сотни раз, что и является причиной отказов преобразователей.

Как видно из рис. 5, увеличение коэффициента усиления  $\alpha_2$  приводит к квазипериодическим колебаниям по сценарию бифуркации Неймарка–Сакера.

На рис. 6 представлены зависимости КПД ( $\eta$ ) от напряжения источника питания ( $E_0$ ). Использование полевых транзисторов позволяет получить достаточно высокое значение КПД даже при низких величинах  $E_0$ .

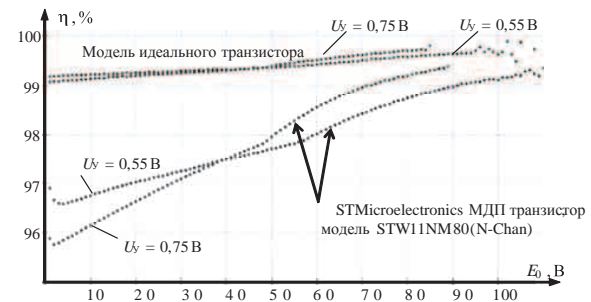


Рис. 6. Зависимость КПД ДПП от напряжения источника питания

### Выводы

1. Предложен двухфазный преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов, имеющий повышенную энергоэффективность и надежность за счет уменьшения динамических потерь переключения.
2. Использование дросельного коммутирующего элемента в двухфазном преобразователе для осуществления мягкой коммутации транзисторов позволяет повысить технико-экономические показатели полупроводникового преобразователя за счет снижения динамических потерь.
3. Анализ динамических режимов функционирования двухфазного преобразователя повышающего типа показал, что область его динамической устойчивости существенно расширяется по сравнению с однотактным преобразователем.
4. Установлено, что применение в двухфазном повышающем преобразователе частотно-импульсной модуляции с мягкой коммутацией транзисторов сопровождается бифуркацией Неймарка–Сакера с последующим зарождением хаотических движений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters / Edwin van Dijk, Herman J.N. Spruijt, Dermot M. O'Sullivan, J. Ben Klaassens // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1995. – P. 659–665.
2. Kocewiak L. Bifurcations and Chaos in a DC-DC Buck Converter // Elektronika. – 2008. – № 10. – P. 105–110.
3. Zhusubaliyev Zh.T, Soukhoterin E.A., Mosekilde E. Border-collision bifurcations and chaotic oscillations in a piecewise-smooth dynamical system // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2001. – V. 11. – № 12. – P. 2977–3001.
4. Femia N., Spagnuolo G., Vitelli M. Steady-state analysis of hard and soft switching DC-to-DC regulators // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – V. 18. – № 1. – P. 51–64.



5. Combined PWM and PFM control for universal line voltage of a piezoelectric transformer off-line converter / S. Hamamura, T. Ninomiya, M. Yamamoto, M. Katsuno // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – V. 18. – P. 270–277.
6. Tse C.K. Flip Bifurcation and Chaos in Three-state Boost Switching Regulators // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. – 1994. – V. 41. – № 1. – P. 16–23.
7. Hasaneen B.M., Elbaset Mohammed A.A. Design and Simulation of DC/DC Boost Converter. 2008. P. 335–340. URL: [http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=dr\\_adel72](http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=dr_adel72) (дата обращения: 01.11.2013).
8. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, А.И. Андриянов, С.Г. Михальченко. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 294 с.
9. Михальченко Г.Я., Малаханов А.А. Математическая модель однофазного корректора коэффициента мощности // Доклады ТУСУР. – 2008. – № 2 (18). – Ч. 2. – С. 143–149.
10. High-Feedback Operation of Power Electronic Converters / Zh.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, A.I. Andriyanov, G.Ya. Mikhailchenko // Electronics. – 2013. – № 2 (2). – P. 113–167. URL: <http://www.mdpi.com/2079-9292/2/2/113> (дата обращения: 01.11.2013).

Поступила 11.11.2013 г.

UDC 621.314.2:632

## DYNAMIC PROPERTIES OF A TWO-PHASE BOOST CONVERTER WITH SOFT-SWITCHING TRANSISTORS TECHNOLOGY

**Robert C. Dixon,**

PhD, Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. Jamaica National commission for UNESCO, Jamaica, Kingston 5, Dominica Drive 25. E-mail: [dixon\\_robert@mail.ru](mailto:dixon_robert@mail.ru)

**Yuriy N. Dementyev,**

PhD. Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: [dementiev@mail2000.ru](mailto:dementiev@mail2000.ru)

**Genadiy Ya. Mikhailchenko,**

Dr. Sc., Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [kpe-tusur@yandex.ru](mailto:kpe-tusur@yandex.ru)

**Sergey G. Mikhailchenko,**

Dr. Sc., Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [msg@ie.tusur.ru](mailto:msg@ie.tusur.ru)

**Sergey M. Semenov,**

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: [epeo@enin.tpu.ru](mailto:epeo@enin.tpu.ru)

*The relevance of the work is determined by the need to develop a method for improving the efficiency and reliability of voltage converters reducing the dynamic switching losses of various devices, and decreasing inner energy storage for wide application in consumer electronics and industrial engineering systems.*

**Objective:** to provide an alternative way of implementing soft-switching transistors through an inductive energy stored technique of the inductive element for the two-phase boost converter type. The inductive commutation switching element can provide an alternative method, which can improve and raise the technical and economical performance of switched-mode power supply (SMPS) devices. Hence, reducing the dynamic losses of the transistors crystalline structure and including the reduction of electromagnetic interference (EMI) occurrences.

**Methods:** reviewing of technical publications concerning hard and soft techniques including their dynamic properties. A modelled simulation of the two-phase boost converter with soft-switching transistors has been studied in variety of software environment, such as SwCAD and MATLAB platform. Thus, the analysis of static and dynamic characteristics of the device incorporates the Newton-Raphson method (e.g. equating vector of state variables real roots in its transient and steady state), which has a sufficiently rapid convergence for a precise value and with a fair degree of accuracy of the discrete values found – shown below in the chaos and bifurcation phenomena regimes.

**Results:** the authors have proposed the voltage converter control system designed on the basis of a two-phase boost converter with soft-switching transistors, which is capable of increasing performance and reliability; hence, the life of the SMPS device. It can also provide high efficiency even at low voltage power supply.

**Key words:**

Zero voltage switching, zero current switching, two phase boost converter, pulse frequency modulation, switching losses, bifurcation

phenomena, chaos regimes, voltage converter operation.

#### REFERENCES

1. Edwin van Dijk, Herman J.N. Spruijt, Dermot M. O'Sullivan, J. Ben Klaassens. PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, pp. 659–665.
2. Kocewiak L. Bifurcations and Chaos in a DC-DC Buck Converter. *Elektronika*, 2008, no. 10, pp. 105–110.
3. Zhusubaliyev Zh.T., Soukhoterin E.A., Mosekilde E. Border-collision bifurcations and chaotic oscillations in a piecewise-smooth dynamical system. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2001, vol. 11, no. 12, pp. 2977–3001.
4. Femia N., Spagnuolo G., Vitelli M. Steady-state analysis of hard and soft switching DC-to-DC regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 51–64.
5. Hamamura S., Ninomiya T., Yamamoto M., Katsuno M. Combined PWM and PFM control for universal line voltage of a piezoelectric transformer off-line converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, vol. 18, pp. 270–277.
6. Tse C.K. Flip Bifurcation and Chaos in Three-state Boost Switching Regulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 1994, vol. 41, no. 1, pp. 16–23.
7. Hasaneen B.M., Elbaset Mohammed A.A. *Design and Simulation of DC/DC Boost Converter*. 2008. pp. 335–340. Available at: [http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=dr\\_adel72](http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=dr_adel72) (accessed 01.11.2013).
8. Kobzev A.V., Mikhailchenko G.Ya., Andriyanov A.I., Mikhailchenko S.G. *Nelineynaya dinamika poluprovodnikovyykh preobrazovateley* [Nonlinear dynamics of semiconductor in power electronics converters]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2007. 294 p.
9. Mikhailchenko G.Ya., Malakhanov A.A. Matematicheskaya modelodnofaznogo korektora koeffitsienta moshchnosti [Mathematical model of a single-phase power factor corrector]. *Doklady TUSUR*, 2008, no. 2 (18), P. 2, pp. 143–149.
10. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E., Andriyanov A.I., Mikhailchenko G.Ya. High-Feedback Operation of Power Electronic Converters. *Electronics*, 2013, no. 2 (2), pp. 113–167. Available at: <http://www.mdpi.com/2079-9292/2/2/113> (accessed 01.11.2013).

УДК 621.311

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ИНВЕРТОРОВ ТОКА

**Осипов Александр Владимирович,**

канд. техн. наук, зав. лаб. НИИ автоматики и электромеханики при Томском университете систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ossan@mail.ru

**Шиняков Юрий Александрович,**

д-р техн. наук, директор НИИ космических технологий Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: shua@main.tusur.ru

**Отто Артур Исаакович,**

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ottoai@mail.ru

**Черная Мария Михайловна,**

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: cmm91@inbox.ru

**Ткаченко Александр Александрович,**

канд. техн. наук, зав. отделом НИИ автоматики и электромеханики при Томском университете систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ossan@mail.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью создания энергетически эффективной системы электропитания космического аппарата.*

**Цель работы:** Синтез инверторно-трансформаторной структуры системы электропитания космического аппарата на основе инверторов тока, позволяющей реализовать режим максимального отбора мощности солнечной батареи при проектировании системы электропитания космического аппарата с любым выходным напряжением.

**Методы исследования** основаны на общих положениях теории электрических цепей, теории алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем и методов математического моделирования.

**Результаты:** Предложена структура системы электропитания космического аппарата с суммированием выходных токов инверторов в общем узле, которая позволяет регулировать напряжение солнечной батареи в диапазоне, достаточном для реализации режима максимального отбора мощности. Получены регулировочные характеристики преобразователя при дрейфе вольт-амперной характеристики солнечной батареи и различных значениях нагрузки. Показано, что в системах суммирования тока положение рабочей точки вольт-амперной характеристики солнечной батареи не зависит от мощности нагрузки.

**Ключевые слова:**

*Система электропитания космического аппарата, инвертор тока, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, экстремальное регулирование мощности.*

### Введение

Одной из основных задач, возникающих при проектировании систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) является согласование уровней напряжения нагрузки с напряжениями используемых в СЭП источников питания, солнечной (СБ) и аккумуляторной батареи (АБ). Учитывая, что СБ имеет нелинейные вольт-амперную (ВАХ) и вольт-ваттную (ВВХ) характеристики с ярко выраженным максимумом мощности, преобразователь желательно проектировать таким образом, чтобы диапазон регулирования напряжения СБ охватывал точку максимума ВВХ [1]. Однако в

СЭП большой мощности с выходным напряжением 100 В в настоящее время наибольшее распространение получила шунтовая схема преобразователя (повышающая схема преобразователя постоянного напряжения), которая не может формировать напряжение на СБ более 100 В, в результате чего точка максимума мощности ВАХ при низких температурах СБ может оказаться неохваченной [2, 3]. Кроме того, работа на токовом участке ВАХ СБ вызывает значительные пульсации её напряжения и уменьшает фильтрующие свойства дросселя повышающего преобразователя. Установка конденсаторов на входе преобразователя приводит к возник-

кновению ограниченных параметрами СБ низкочастотных колебаний входного напряжения и тока, которые могут быть демпфированы установкой согласованного фильтра [4].

Желание реализовать режим максимального отбора мощности на всем цикле работы СЭП КА при произвольно заданном выходном напряжении приводит к появлению преобразователей на основе инверторно-трансформаторных схем [5–7]. В этом случае уровни напряжения источников произвольно согласовываются с нагрузкой коэффициентами трансформации, что позволяет применять первичные источники питания СБ и АБ с любыми напряжениями. При этом важным вопросом является выбор способа суммирования энергии первичных источников, которое может осуществляться как на основе суммирования напряжений инверторов в общем контуре, так и путем суммирования токов инверторов в общем узле [5].

При применении преобразователей с суммированием напряжений источников вторичные обмотки трансформаторов включаются последовательно, значение выходного напряжения определяется суммой выходных напряжений инверторов, регулируемых фазовым способом. Применительно к СЭП такая структура подробно рассмотрена в [5], отмечено, что главная проблема реализации заключается в зависимости соотношения суммируемых напряжений от нагрузки, что требует быстродействующего контура регулирования преобразователем.

Инверторные схемы с суммированием токов, имеющие параллельное включение вторичных обмоток трансформаторов, лишены этого недостатка, так как суммируются именно токи инверторов, а амплитуды выходных напряжений инверторов тока равны напряжению питания. Однако имеется ряд сложностей, связанных с проектированием необходимых в этом случае инверторов тока, заключающихся в установке последовательно с транзисторами инвертора блокирующих диодов. Существует вариант реализации суммирования токов инверторов напряжения на одном многообмоточном трансформаторе [6], такая схема позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке, однако не позволяет регулировать напряжение СБ из-за ее параллельного включения с АБ через трансформатор.

Настоящая работа посвящена синтезу энергетически эффективного инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока для СЭП КА и исследованию его характеристик и режимов работы.

**Инверторно-трансформаторный преобразователь с суммированием токов солнечной и аккумуляторной батареи на основе инверторов тока и анализ его характеристик**

Исходя из топологии схемы суммирования токов, источники СЭП целесообразно преобразовывать в источники тока и, соответственно, применять инверторы тока, имеющие ключи с односто-

ронней проводимостью и двусторонней блокировкой, т. е. имеющие последовательно включенный с транзистором блокирующий диод. Установка диодов необходима для исключения закорачивания напряжения соседнего инвертора при реализации режима выхода тока инвертора из узла суммирования, который реализуется отпиранием транзисторов, образующих стойку инвертора, и закорачиванием входного источника. При этом установка диодов приводит к существенному снижению КПД инвертора.

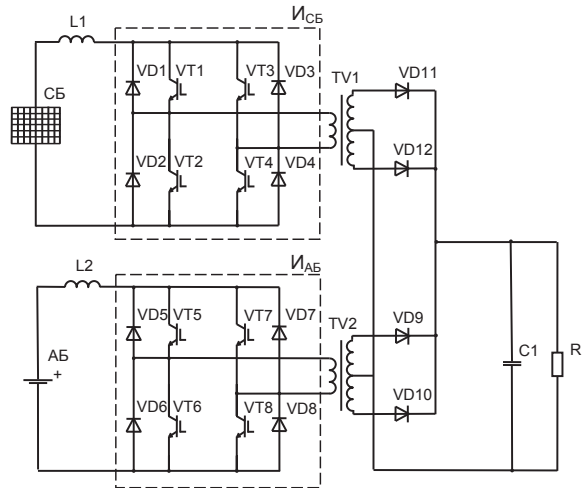


Рис. 1. СЭП с суммированием токов выпрямителей в общем узле на основе инверторов тока

Для суммирования токов предлагается вариант СЭП КА с суммированием выходных токов выпрямителей, что позволяет избежать установки в инвертор блокирующих диодов и реализовывать его по классической схеме инвертора напряжения (рис. 1), в такой схеме отпирание транзисторов стойки одного из инверторов не приводит к закорачиванию выходного напряжения соседнего инвертора.

В представленной схеме работа инверторов основана на принципе повышающего преобразователя, который заключается в формировании на такте управления преобразователем двух интервалов, интервала накопления тока во входных дросселях, на котором открыты транзисторы одной из стоек инвертора, и интервала передачи тока в нагрузку, на котором открыты транзисторы одной из диагоналей инвертора. Данный принцип управления может быть реализован путем фазового сдвига управляющих импульсов транзисторов верхней пары инвертора относительно нижней на определенный угол, определяющий относительную длительность импульса выходного тока инвертора, которая связывает выходные параметры преобразователя с входными

$$U_H = \frac{U_{CB}}{\gamma_{CB} K_{тр, CB}} = \frac{U_{AB}}{\gamma_{AB} K_{тр, AB}},$$

$$I_H = K_{тр, CB} \gamma_{CB} I_{CB} + K_{тр, AB} \gamma_{AB} I_{AB}, \quad (1)$$

где  $I_H$ ,  $U_H$  – ток и напряжение нагрузки;  $I_{CB}$ ,  $U_{CB}$ ,  $I_{AB}$ ,  $U_{AB}$  – токи и напряжения источников;  $\gamma_{CB}$ ,  $\gamma_{AB}$  –



относительные длительности импульсов тока инверторов. Из соотношений видно, что напряжение нагрузки может стабилизироваться инвертором  $I_{AB}$ , в то время как инвертор  $I_{CB}$  регулирует входное напряжение СБ.

Питание нагрузки заданным напряжением в преобразователе, построенном по этой структуре, может быть реализовано при различных соотношениях токов, потребляемых от первичных источников СБ и АБ. Так, при фазовом сдвиге управляющих импульсов верхней пары транзисторов инвертора  $I_{CB}$  относительно нижней на угол  $\alpha_{CB} \approx \pi$  длительность импульсов его выходного тока  $\gamma_{CB} \rightarrow 0$ , поэтому нагрузку полностью питает АБ, ток СБ закорочен инвертором и исключен из узла суммирования, поэтому  $I_{CB} \rightarrow I_{K3}$ ,  $U_{CB} \rightarrow 0$ . По мере увеличения длительности импульсов  $\gamma_{CB}$  инвертор  $I_{CB}$  начинает генерировать ток в узел суммирования, что компенсируется уменьшением тока, генерируемого инвертором  $I_{AB}$ , баланс мощности смещается в сторону потребления энергии от СБ. Напряжение на СБ увеличивается, но не достигает точки с максимальной мощностью  $0 < U_{CB} < U_{opt}$ , т. е. СБ по-прежнему недоиспользуется. Максимальное использование СБ достигается при некотором значении  $\gamma_{CBopt}$ , при котором напряжение на СБ увеличивается до  $U_{opt}$ , в результате чего СБ передает в нагрузку максимальное значение мощности, что приводит к максимальному уменьшению мощности, потребляемой от АБ. Такой режим энергетически наиболее эффективен. Поэтому в представленной структуре предполагается следующий режим работы. Инвертор  $I_{CB}$  регулирует напряжение на СБ и соответственно положение рабочей точки ее ВАХ таким образом, чтобы получить максимальную мощность, т. е. работает в режиме экстремального регулирования мощности СБ, а инвертор  $I_{AB}$  осуществляет стабилизацию напряжения на нагрузке, обеспечивая необходимую добавку тока, при этом длительность импульсов управления АБ инвертора  $\gamma_{AB}$  будет определяться только напряжением  $U_{AB}$ .

Коэффициенты трансформации в такой структуре можно рассчитать исходя из того, что каждый из первичных источников должен питать нагрузку автономно

$$K_{тр\_CB} = \frac{U_{CB\_max}}{U_H},$$

$$K_{тр\_AB} = \frac{U_{AB}}{U_H}. \quad (2)$$

Следует отметить, ВАХ СБ не является постоянной и существенно зависит от температуры, которая может изменяться в широких пределах, остывая на теневом участке орбиты и нагреваясь на освещенном. Поэтому для определения характеристик схемы суммирования токов необходима математическая модель СБ, приемлемую точность обеспечивает следующее выражение [8]

$$I_{CB} = I_{K3} \left( 1 - \left( 1 - \frac{I_{opt}}{I_{K3}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CB}}{U_{XX} - U_{opt}}} \right), \quad (3)$$

на основе которого для солнечной панели КСМ-160 с параметрами  $U_{XX1}=52,46$  В,  $I_{K3}=4,78$  А,  $U_{opt1}=43,1$  В,  $I_{opt}=4,3$  А при  $-30$  °С и параметрами  $U_{XX2}=40,7$  В,  $I_{K3}=4,78$  А,  $U_{opt2}=33,2$  В,  $I_{opt}=4,3$  А при  $+40$  °С получены ВАХ и ВВХ, представленные на рис. 2.

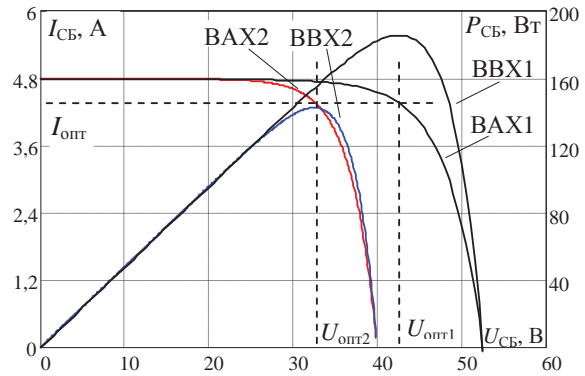


Рис. 2. Характеристики фотоэлектрических панелей КСМ-160 при  $-30$  и  $+40$  °С

Путем решения в MathCad уравнений (1)–(3) для солнечной панели КСМ-160 с ВАХ (рис. 2) получены регулировочные характеристики при стабилизации напряжения  $U_H=100$  В, напряжении АБ  $U_{AB}=24$  В, коэффициенты трансформации выбраны по условию (2), т. е.  $K_{тр\_CB}=0,431$ ,  $K_{тр\_AB}=0,24$ . Характеристики представлены на рис. 3 при различных мощностях нагрузки и показывают, что дрейф напряжения оптимальной точки ВАХ СБ требует пропорционального изменения длительности импульсов тока СБ инвертора  $\gamma_{CB}$ , при этом изменение мощности нагрузки не требует регулирования, перераспределение токов источников происходит без изменения  $\gamma_{CB}$  и  $\gamma_{AB}$ .

При мощностях нагрузки меньших максимальной мощности СБ, ( $P_H < P_{CB}$ ) в СЭП наблюдается избыток мощности, что отражается на характеристиках в виде участка с отрицательным значением мощности АБ, что говорит о ее заряде энергией СБ. Однако в схеме рис. 1 этот режим невозможен из-за диодов выпрямителя, что не позволяет осуществить рекуперацию энергии в АБ. Реализовать режим рекуперации энергии, т. е. заряд АБ напряжением нагрузки можно только при условии введения в схему реверсивного выпрямителя по схеме рис. 4.

В представленной схеме при уменьшении тока, потребляемого с АБ, до нуля транзисторы VT5–VT8 закрываются, а транзисторы VT9, VT10, поочередно замыкаясь, формируют на обмотках трансформатора TV2 переменное напряжение, которое после выпрямления диодами VD5–VD8 и сглаживания дросселем L2 создает требуемый зарядный ток АБ. Такое построение СЭП позволяет совместить зарядное и разрядное устройства и за

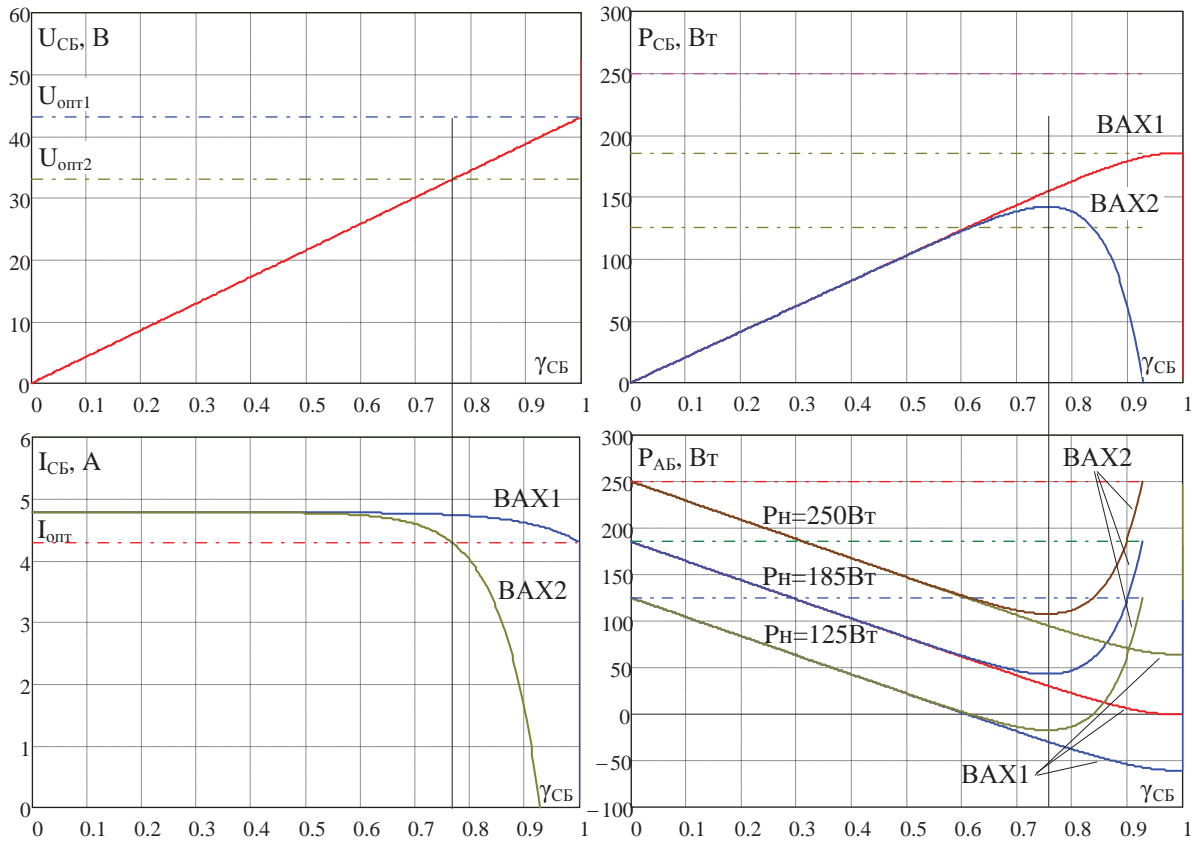


Рис. 3. Характеристики инверторно-трансформаторного преобразователя с суммированием токов при  $U_H=100\text{ В}$ ,  $U_{AB}=24\text{ В}$ , на панели КСМ-160 при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$   $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  с коэффициентами трансформации  $K_{\text{тр.СБ}}=0,431$ ,  $K_{\text{тр.АБ}}=0,24$

счет этого уменьшить массогабаритный показатель СЭП. Однако передача энергии в процессе заряда через два инвертора и два выпрямителя снижает КПД. Увеличить КПД можно формированием дополнительного непосредственного канала передачи энергии от СБ к АБ. Таким образом, при проектировании СЭП всегда присутствует поиск компромисса между КПД и массогабаритным показателем.

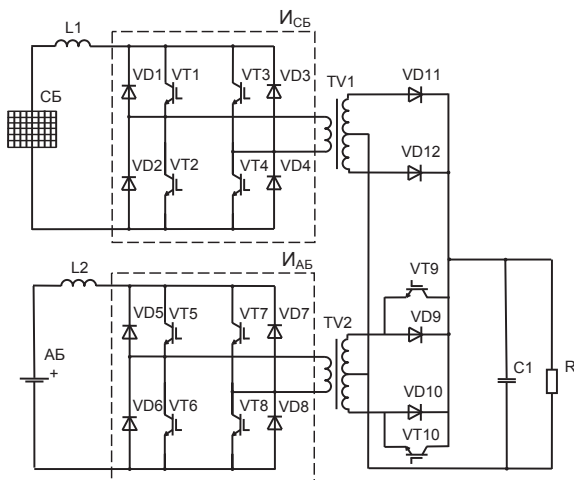


Рис. 4. СЭП на основе инверторов тока с суммированием токов в общем узле и реверсивным выпрямителем

### Моделирование инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока

Моделирование инверторно-трансформаторного преобразователя на инверторах тока проведено в среде Orca9.2. Инверторы реализованы на идеальных ключах с двухсторонней проводимостью, частота коммутации 50 кГц. Параметры фильтра: индуктивность входного дросселя инвертора  $L=100\text{ мкГн}$ , емкость выходного конденсатора  $C=50\text{ мкФ}$ . Коэффициенты трансформации выбраны согласно данным рекомендациям  $K_{\text{тр.СБ}}=0,5$ ,  $K_{\text{тр.АБ}}=0,33$ . Напряжение нагрузки  $U_H=100\text{ В}$ , напряжение аккумуляторной батареи постоянно  $U_{AB}=24\text{ В}$ , модель солнечной батареи КСМ-160 задавалась по точкам табличным способом по данным ВАХ (рис. 2). Результаты моделирования преобразователя с СБ КСМ-160 при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и различных нагрузках представлены на рис. 5.

На рис. 6, а представлен случай недостатка вырабатываемой СБ мощности  $P_H > P_{CB}$  при работе СБ в точке ВАХ с максимальной мощностью. Выходное напряжение  $U_H=100\text{ В}$  стабилизируется инвертором  $I_{AB}$  при  $\gamma_{AB}=0,73$ , инвертор  $I_{CB}$  регулирует напряжение СБ по условию ее максимальной мощности, которая достигнута при  $\gamma_{CB}=0,86$ , значения совпадает с расчетными по выражению (1). Нагрузка потребляет от СБ максимальную мощность, недостаток компенсируется за счет АБ.

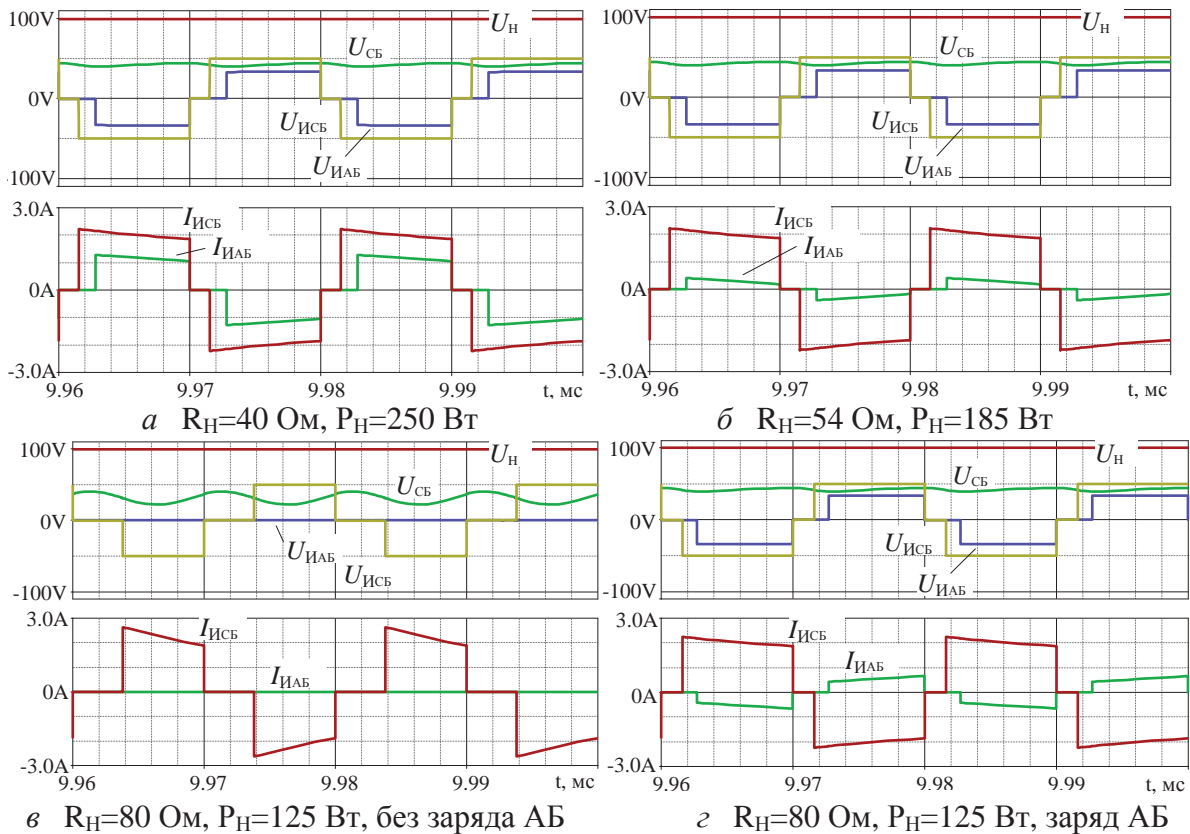


Рис. 5. Результаты моделирования инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока при СБ КСМ-160 при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  и различных нагрузках

При равенстве мощностей  $P_{\text{H}}=P_{\text{СБ}}$  (рис. 5, б) параметры инвертора  $I_{\text{СБ}}$  не изменяются, выходной ток  $I_{\text{СБ}}$  остается прежним, потребление с  $I_{\text{АБ}}$  минимальное и компенсирует недобор мощности с СБ, вызванный пульсацией его напряжения. Длительность импульсов тока остались прежними.

При дальнейшем уменьшении мощности нагрузки  $P_{\text{H}}<P_{\text{СБ}}$  возможно два случая: неиспользование избыточной мощности и заряд АБ избыточной мощностью. При неиспользовании избыточной мощности (рис. 5, в) транзисторы инвертора  $I_{\text{АБ}}$  могут быть выключены, в результате чего его выходной ток равен нулю. Напряжение нагрузки в этом случае стабилизирует инвертор  $I_{\text{СБ}}$ , уменьшая длительность импульса тока до  $\gamma_{\text{СБ}}=0,63$  и переходя на токовую ветвь ВАХ СБ. При этом отмечается увеличение пульсаций напряжения на АБ, что объясняется формой ВАХ СБ.

При заряде АБ избыточной мощностью (рис. 5, г) стабилизация напряжения на нагрузке достигается реверсом выходного выпрямителя инвертора  $I_{\text{АБ}}$ , длительность импульсов напряжения которого совпадает с прежней  $\gamma_{\text{АБ}}=0,73$ .

Таким образом, изменение нагрузки в данной схеме СЭП не требует изменения длительности импульсов тока инверторов, значение  $\gamma_{\text{СБ}}=0,86$  меняется только при неиспользовании избыточной мощности (рис. 5, в).

Результаты моделирования преобразователя с СБ КСМ-160 при нагреве ВАХ СБ до температуры  $+40^{\circ}\text{C}$  и различных нагрузках представлены на рис. 6.

Учитывая, что мощность оптимальной точки ВАХ уменьшилась, случай недостатка вырабатываемой СБ мощности  $P_{\text{H}}>P_{\text{СБ}}$  представлен на рис. 6, а, б. Выходное напряжение  $U_{\text{H}}=100\text{ В}$  стабилизируется инвертором  $I_{\text{АБ}}$  при прежней длительности импульса  $I_{\text{АБ}}$ , т. е. при  $\gamma_{\text{АБ}}=0,73$ , что объясняется стабильностью  $U_{\text{АБ}}$ . Для достижения максимальной мощности СБ длительность импульса  $I_{\text{СБ}}$  смещена до  $\gamma_{\text{СБ}}=0,7$ . Недостаток мощности компенсируется за счет АБ, при этом изменение нагрузки приводит лишь к изменению амплитуды тока АБ, длительности импульсов остаются прежними.

При уменьшении мощности нагрузки  $P_{\text{H}}<P_{\text{СБ}}$  также возможно два случая: неиспользование избыточной мощности и заряд АБ избыточной мощностью. При неиспользовании избыточной мощности (рис. 6, в) процессы происходят аналогично рис. 5. Стабилизация напряжения нагрузки в этом случае достигнута  $\gamma_{\text{СБ}}=0,63$ .

Следует отметить, что во всех рассмотренных случаях амплитуда тока в инверторе  $I_{\text{СБ}}$  не меняется  $I_{\text{СБ}}\approx 2\text{ А}$ , что говорит об отсутствии завышения габаритной мощности его транзисторов.

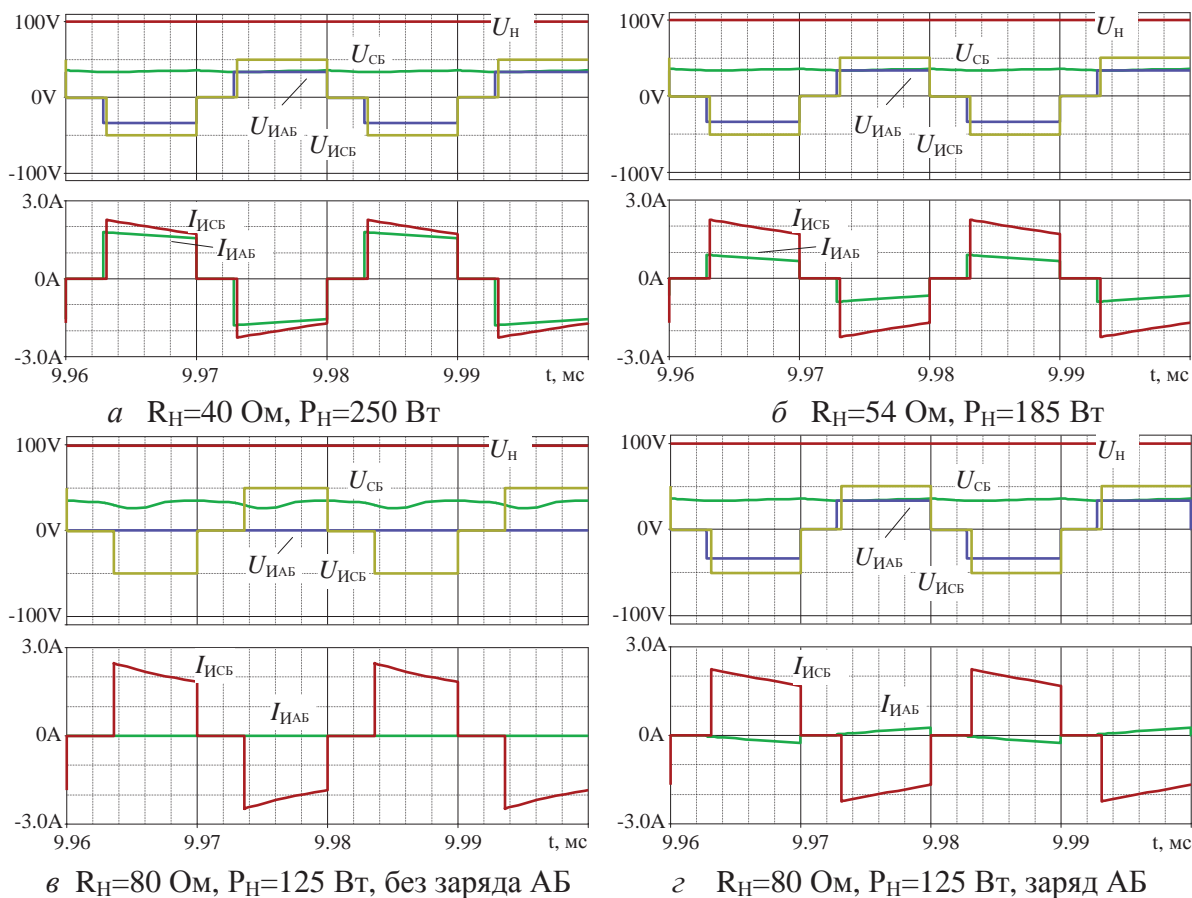


Рис. 6. Результаты моделирования инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока при СБ КСМ-160 при температуре +40 °С и различных нагрузках

**Выводы**

1. Применение в системах электропитания космических аппаратов инверторно-трансформаторных преобразователей на основе инверторов тока позволяет регулировать напряжение солнечной батареи в диапазоне от нуля до значения определяемого приведенной через трансформатор нагрузкой и реализовывать, таким образом, экстремальное регулирование мощности солнечных батарей при любых уровнях напряжения нагрузки и источников системы электропитания.
2. Полученные регулировочные характеристики преобразователя с суммированием токов (рис. 3) показали, что в отличие от преобразователей с суммированием напряжений в общем контуре [5], изменение нагрузки не требует регулирования токов инверторов  $I_{СБ}$ ,  $I_{АБ}$ , что упрощает ре-

ализацию системы управления преобразователем. При дрейфе ВАХ солнечной батареи для сохранения режима максимальной мощности СБ необходимо пропорциональное изменение длительности импульсов тока  $\gamma_{СБ}$ .

3. Для реализации заряда АБ в структуре системы электропитания (рис. 1) необходим реверсивный выпрямитель в канале АБ (рис. 4), что уменьшает массогабаритный показатель за счет более полного использования элементов канала АБ, однако приводит к многократному преобразованию энергии в процессе заряда и уменьшению КПД.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований и экспериментальных разработок)» 2385.2014.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: ВО «Наука», 1994. – 318 с.
2. Mukund R. Patel. Spacecraft power systems. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. URL: [http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel\\_-\\_Spacecraft\\_Power\\_Systems.pdf](http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel_-_Spacecraft_Power_Systems.pdf) (дата обращения: 13.01.2014).
3. Лесных А.Н., Сарычев В.А. Исследование высоковольтных систем электропитания космических аппаратов со стабилизаторами напряжения вольтодобавочного типа // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 6. – С. 63–66.
4. Система электроснабжения космического аппарата с интегрированным повышающим преобразователем напряжения / Ю.М. Казанцев, К.Г. Гордеев, А.Ф. Лекарев, А.М. Гаврилов // Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 125. – № 6. – С. 41–44.
5. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 126–132.
6. Система электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2396666; заявл. 29.06.2009; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. – 8 с.
7. Способ электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2488933; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.13, Бюл. № 21. – 7 с.
8. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 2. – С. 102–107.

Поступила 05.12.2013 г.

UDC 621.311

## POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACECRAFT BASED ON ADJUSTABLE CURRENT INVERTERS

**Aleksandr V. Osipov,**

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [ossan@mail.ru](mailto:ossan@mail.ru)

**Yuriy A. Shinyakov,**

Dr. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [shua@main.tusur.ru](mailto:shua@main.tusur.ru)

**Artur I. Otto,**

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [ottoai@mail.ru](mailto:ottoai@mail.ru)

**Mariya M. Chernaya,**

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [cmm91@inbox.ru](mailto:cmm91@inbox.ru)

**Aleksandr A. Tkachenko,**

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: [ossan@mail.ru](mailto:ossan@mail.ru)

*The relevance of the research is caused by the need to develop energy efficient power supply system of the spacecraft.*

**Purpose of the research:** *The synthesis of inverter and transformer structure of the power supply system of the spacecraft based on current inverters that allows implementing a mode of the maximum power point tracking of solar batteries when designing power supply systems with any output voltage.*

**Research methods** *are based on general theory of electrical circuits, theory of algebraic equations, computational methods and the use of modern instrumentation systems and methods of mathematical modeling.*

**Results:** *The authors have proposed the structure of the power supply system of the spacecraft summing output currents of inverters in a general node, which allows adjusting solar battery voltage in a range sufficient to implement a mode of the maximum power point tracking. The adjustment characteristics of the converter at drift of current-voltage characteristics of solar battery and different values of the load were obtained. It is shown that in current summing systems the position of the working point of the current-voltage characteristics for the solar battery does not depend on load power.*

### **Key words:**

*Power supply system of a spacecraft, current inverter, solar battery, rechargeable battery, extreme power control.*

## REFERENCES

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft power supply system]. Novosibirsk, Nauka, 1994. 318 p.
2. Mukund R. Patel. *Spacecraft power systems*. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. Available at: [http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel\\_-\\_Spacecraft\\_Power\\_Systems.pdf](http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel_-_Spacecraft_Power_Systems.pdf) (accessed 13 January 2014).
3. Lesnykh A.N., Sarychev V.A. Issledovanie vysokovoltnykh sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov so stabilizatorami napryazheniya voltodobavochnogo tipa [The research of high-voltage power supply systems for spacecrafts with boost converter]. *Bulletin of Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnev*, 2006, no. 6. pp. 63–66.
4. Kazantsev Yu.M., Gordeev K.G., Lekarev A.F., Gavrilov A.M. Sistema electrosnabzheniya kosmicheskogo apparata s integrirovannym povyshayushchim preobrazovatelem napryazheniya [The power supply system of the spacecraft with integrated boost converter voltage]. *Questions of Electromechanics*, 2011, vol. 125, no. 6, pp. 41–44.
5. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. Sistemy electropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove reguliruemyykh preobrazovateley s promezhutochnym zvenom povyshennoy chastoty [The power system based on space vehicles controlled converters with intermediate high frequency link]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 126–132.
6. Kudryashov V.S., Elman V.O., Nestirishin M.V., Gordeev K.G., Gladushchenko V.N., Khartov V.V., Kochura S.G., Soldatenko V.G., Melnikov N.V., Kozlov R.V. *Sistema electropitaniya kosmicheskogo apparata* [The power supply system of the spacecraft]. Patent RF, no. 2396666, 2010.
7. Karplyuk D.S., Korotkikh V.V., Nestirishin M.V., Openko S.I. *Sposob electropitaniya kosmicheskogo apparata* [The method of the spacecraft supply]. Patent RF, no. 2488933, 2013.
8. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arcatova O.E. Povysenie energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelectriceskikh energeticheskikh ustanovok [The increase of power efficiency of the autonomous photovoltaic energy installations]. *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, 2010, no. 2 (22), pp. 102–107.

УДК 621.333:004

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСА

**Михайлов Илья Юрьевич,**

аспирант кафедры электрических комплексов и материалов  
Энергетического института Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mihaylov\_ily@mail.ru

**Муравлев Олег Павлович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры электрических комплексов и материа-  
лов Энергетического института Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mop@tpu.ru

**Федянин Александр Леонидович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических комплексов и материалов  
Энергетического института Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: feydanin@tpu.ru

*Проанализированы отказы 47 троллейбусов на базе Томского трамвайно-троллейбусного управления. Выявлено, что 69,7 % отказов являются эксплуатационными, из них более половины относится к отказам электрического оборудования, наиболее важной частью которого является тяговый электрический двигатель троллейбуса. Актуальность работы обусловлена частыми отказами тяговых двигателей троллейбусов и необходимостью разработать комплекс мероприятий по обеспечению требуемого уровня надежности.*

**Цель работы:** разработать математическую модель статистического определения количественной оценки показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса.

**Методы исследования:** статистические методы определения количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, законов функций распределения.

**Результаты:** представлен алгоритм математической модели определения показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса. Получены количественные показатели надежности тягового двигателя троллейбуса, гистограмма и функции вероятности безотказной работы нормального, логарифмически-нормального закона распределения, а также закона распределения Вейбулла, полученные с помощью предлагаемой математической модели.

**Выводы:** Впервые разработана компьютерная модель расчета количественных показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, позволяющая оценить как электрический двигатель в целом, так и ротор, статор и подшипниковый узел в отдельности. Представленная и описанная компьютерная модель количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, с применением методов статистического анализа, для трех законов распределения: нормального, логнормального и закона распределения Вейбулла, обладает высокой точностью. Алгоритм реализован в вычислительном комплексе Mathcad, позволяет облегчить и ускорить процесс выявления показателей надежности и анализ надежности тяговых электрических двигателей. Получены законы распределения эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, количественная оценка показателей наработки на отказ, интенсивности отказа. Представленные данные использованы для создания программно-вычислительного комплекса количественной оценки показателей надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов.

### **Ключевые слова:**

*Троллейбус, показатели надежности, вероятность безотказной работы, алгоритм определения показателей надежности.*

**Актуальность исследования.** Экономика крупных городов полностью зависит от транспорта. Без надежной доставки трудовых ресурсов к рабочим местам производство остановится. И проблема циклически обостряется: по мере ухудшения работы общественного транспорта из-за заторов все больше горожан пересаживаются на индивидуальные автомобили – в результате потребность в дорожной сети для каждого пассажира увеличивается в 10 раз [1]. Одним из видов городского муниципального транспорта является троллейбус, надежность работы которого экономически целесообразна.

Тяговые асинхронные двигатели – основные электромеханические преобразователи электрической энергии в механическую для троллейбусов. Характерные особенности этих двигателей заклю-

чаются в том, что при отказе любого из них наступает отказ троллейбуса; «слабые звенья» этих двигателей – обмотки статора и ротора, для которых не существует методов технической диагностики и развивающийся дефект всегда приводит к аварийному отказу.

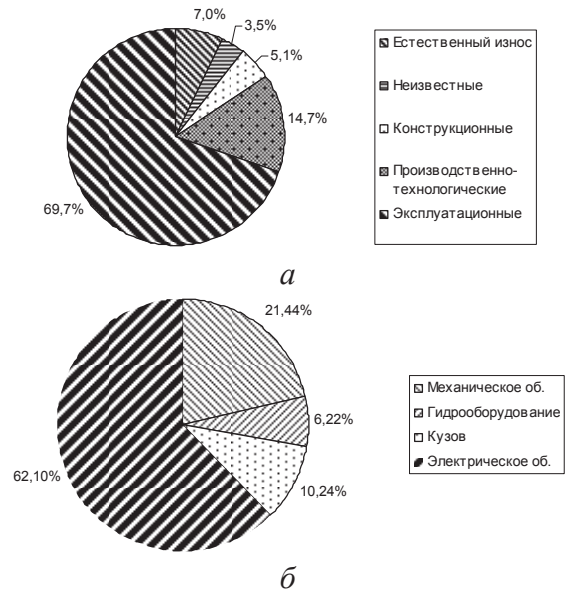
Получение точной информации о рабочем состоянии, производительности системы двигателя, часто имеет решающее значение в поддержании успешной коммерческой эксплуатации таких систем. Для двигателей требуются точные методы проверки состояния, его отказ может отрицательно сказаться на производстве и технологических процессах или других возможностях приносить доход. Экономическая и технологическая эффективности объекта находятся в прямой связи с его

безопасностью. В связи с этим необходимо разработать комплекс мероприятий по обеспечению требуемого уровня надежности. По данным зарубежных источников после внедрения системы технического обслуживания и ремонта с учетом показателей надежности электротехнического оборудования на Детройтском машиностроительном заводе средняя наработка на отказ электрических двигателей увеличилась с 3 до 10,6 лет, а экономическая эффективность увеличилась в 12 раз [2, 3].

**Задача исследования надежности системы** формулируется как задача исследования вероятностных свойств параметров системы, когда по заданным вероятностным характеристикам случайных параметров элементов определяются вероятностные характеристики параметров системы. Полной вероятностной характеристикой случайной величины является ее функция распределения, которую будем моделировать [4].

Для оценки надежности по принятой информации может быть использован показатель вероятности безотказной работы (ВБР)  $P(t)$ . Эта функция обладает хорошей наглядностью, по ней можно определить остальные показатели надежности (среднюю наработку на отказ  $T_{cp}$ , функцию вероятности отказа  $Q(t)$ , интенсивность отказов  $\lambda(t)$  и т. д.).

В ходе исследований были проанализированы отказы электрооборудования (ЭО) 47 троллейбусов на базе Томского трамвайно-троллейбусного управления [5]. Классификация причин потери способности элементов оборудования выполнять заданные функции изображена на рис. 1, а. При этом, как представлено на круговой диаграмме, причины потери работоспособности ЭО во время эксплуатации преобладают (69,7 %) над остальными. Прежде всего, такие показатели связаны с климатическими факторами и агрессивной окружающей средой, проблемами питающей сети, а также некорректной эксплуатацией электрооборудования. Некорректной эксплуатацией оборудования является несвоевременное проведение технического обслуживания и ремонта, а также изменение конструкции без согласования с заводом-изготовителем, неверное прогнозирование остаточного срока службы. Косвенное влияние на эксплуатационную надежность ЭО оказывают конструкционные, производственно-технологические причины потери работоспособности и естественный износ [6–9]. При дальнейшем анализе отказов ЭО троллейбуса было выявлено, что подавляющее большинство случаев потери работоспособности происходит в элементах электрического оборудования (649 случаев из 1045 за 2008–2012 гг.), как показано на рис. 1, б. Большую часть отказов электрического оборудования составляют отказы тяговых электрических двигателей троллейбуса, в результате они имеют наибольшие показатели надежности. Разработана модель эксплуатационной надежности для асинхронных тяговых электрических двигателей троллейбусов, которая учитывает надежность статора, ротора и подшипникового узла.



**Рис. 1.** а) диаграмма распределения причин потери способности элементов оборудования выполнять заданные функции; б) диаграмма распределения видов отказов оборудования во время эксплуатации

Разработанная математическая модель определяет количественные показатели надежности (ПН) описанных узлов асинхронного электрического двигателя. Для определения ПН использованы статистические методы определения надежности, основными начальными параметрами которых являются данные наработки на отказ исследуемых электрических двигателей за некоторый промежуток времени.

Согласно рекомендациям [10] для определения количественных показателей надежности, описанных выше, подходит нормальный закон распределения. На основе предельной теоремы нормальный закон распределения лучше отражает физику и имеет свою основу, в случае большого количества одинаково влияющих (не превалирующих) параметров. При возможных других законах распределения, и исходя из показателей, представленных в табл. 1, 2, принят нормальный закон распределения. В предлагаемой математической модели расчет показателей надежности производится для нормального, логнормального законов распределения, а также закона распределения Вейбулла.

Нормальная модель надежности подразумевает, что вероятность безотказной работы распределяется следующим образом:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx,$$

где  $\mu$  – математическое ожидание;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

В логнормальной модели надежности вероятность безотказной работы распределяется по закону:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} dx,$$



где параметры  $\mu$  и  $\sigma$  аналогичны параметрам нормального распределения.

Функция вероятности безотказной работы модели надежности Вейбулла имеет вид:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta},$$

где  $\beta$  – параметр формы;  $\eta$  – параметр, определяющий масштаб распределения:

$$\eta = e^{-\frac{a}{b}},$$

$$\beta = b.$$

В свою очередь  $a$  и  $b$  определяются следующими выражениями:

$$a = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i \right],$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}}.$$

Точность вышеприведенных моделей оценивается с помощью коэффициента корреляции Пирсона [6]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{P}(t_i) - \bar{P}) \cdot (P(t_i) - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{P}(t_i) - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (P(t_i) - \bar{P})^2}},$$

где  $\bar{P}$  и  $\bar{P}$  – средние арифметические значения ВБР по результатам эксперимента и по одной из трех моделей надежности [11–15].

В табл. 1 представлены полученные ПН исследуемых элементов тягового электрического двигателя. Согласно представленным данным ротор тя-

гового двигателя имеет наименьшую наработку на отказ, что свидетельствует о малом количестве отработанных часов данного элемента по сравнению с остальными, а также подверженности разрушению. Нарботки на отказ статора и подшипникового узла почти одинаковы, что доказывает меньшую подверженность разрушениям в период эксплуатации. При этом показатели средней интенсивности отказов свидетельствуют о более частом выходе из строя подшипникового узла и ротора, по сравнению со статором, что противоречит общепринятой картине [16]. Также в данной таблице представлены функции распределения для каждого конкретного элемента и двигателя в целом.

В табл. 2 показаны параметры надежности и коэффициенты корреляции, полученные с помощью разработанной компьютерной модели. При анализе данных табл. 2 сделан вывод, что коэффициент корреляции нормального закона распределения для ротора ниже, чем при законе распределения Вейбулла, но в случае рассмотрения статора и подшипникового узла ситуация меняется в противоположную сторону. Сравнивая коэффициенты корреляции логнормального и нормального законов распределения, можно легко убедиться в точности нормального. Исходя из значений табл. 2 и особенностей нормального закона доказывается принятие за основу нормального закона распределения.

Следующим этапом исследования стала разработка компьютерной модели расчета ПН.

На рис. 2 представлен алгоритм компьютерной модели расчета показателей эксплуатационной надежности. Реализация компьютерной модели происходила в вычислительном комплексе Mathcad [17, 18].

**Таблица 1.** Количественные показатели надежности и функции распределения элементов тягового электрического двигателя троллейбуса

Элементы тягового электродвигателя	$T_{cp}$ , ч	$\lambda_{cp}$	Функция распределения
Ротор	747,25	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,663 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-747,25)^2}{9,926 \cdot 10^5}}$
Статор	987,92	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 6,293 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-987,92)^2}{8,037 \cdot 10^5}}$
Подшипниковый узел	910,29	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,741 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-910,28)^2}{9,657 \cdot 10^5}}$
Электрический двигатель в целом	816,94	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$f(x) = 5,824 \cdot 10^{-4} e^{-\frac{(x-816,94)^2}{9,385 \cdot 10^5}}$

**Таблица 2.** Параметры моделей надежности и коэффициенты корреляции

Элементы тягового электродвигателя	Закон распределения								
	Вейбулла			Нормальный			Логнормальный		
	$\eta$	$\beta$	$r$	$\Sigma$	$\mu$	$r$	$\Sigma$	$\mu$	$r$
Ротор	794,39	0,916	0,9855	704,49	747,25	0,9554	1,405	6,078	0,9578
Статор	1158	1,151	0,9574	633,91	987,92	0,9840	1,143	6,577	0,9005
Подшипниковый узел	1028	0,96	0,9436	694,89	910,28	0,9747	1,363	6,360	0,8893
Электрический двигатель в целом	874,44	1,104	0,9905	685,01	816,94	0,9707	1,183	6,257	0,9579

Описание алгоритма:

1. Ввод исходных данных, реализованный путем чтения файла Excel с данными наработок на отказ, как только поступивших в эксплуатацию тяговых электродвигателей, так и вышедших после ремонта. Также оператору необходимо ввести значение для расчета гамма-процентной наработки и значение доверительной вероятности.
2. Анализ и обработка получившегося исходного массива данных, которая включает в себя определение среднего значения и стандартного отклонения. Рассчитанные значения являются основополагающими для дальнейших статистических расчетов.
3. Формирование массива данных для функции Median Rank, с помощью которой происходит вычисление всех представленных законов распределения. При использовании метода Median Rank необходимо взять все ранги, соответствующие каждому элементу, и расположить их в порядке неубывания. Затем вычислить для каждого элемента медиану – среднее арифметическое центральных членов вариационного ряда, и построить ранжировку согласно принципу – чем меньше ранг, тем предпочтительней элемент [19].
4. Расчет вспомогательных функций для нормального, логарифмически-нормального законов распределения и закона распределения Вейбулла.
5. Расчет точностных характеристик параметров, при котором происходит уточнение значений и определение границ применимости соответствующего закона.
6. Вывод количественного значения показателей надежности двигателя (вероятности безотказной работы, наработки на отказ, интенсивности отказа и т. д.), графиков функций распределения  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\Lambda(t)$  и точностных характеристик параметров распределения.

Гистограмма, представленная на рис. 3, а, доказывает низкие показатели эксплуатационной надежности, а также изъяны производственно-технологической надежности на начальном этапе эксплуатации. Представленные на рис. 3, б, в, г характеристики распределения ВБР свидетельствуют о более точном определении зависимости нормального закона распределения и закона распределения Вейбулла, относительно фактических значений. На рис. 3 представлены распределения ВБР для электрического двигателя в целом. Учитывая происходящие физические процессы во время эксплуатации и беря во внимание коэффициенты корреляции статора, ротора и подшипникового узла, представленные в табл. 2, авторами принято решение о выборе нормального закона распределения как более точного для построения модели эксплуатационной надежности электрооборудования троллейбуса.

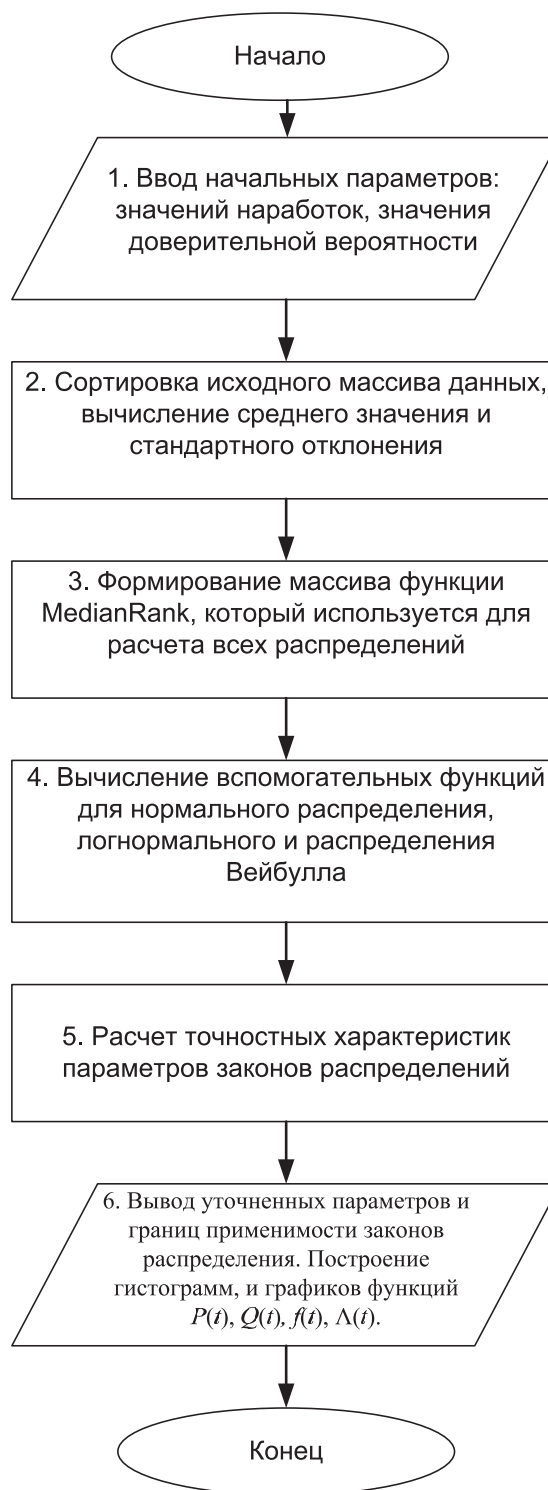
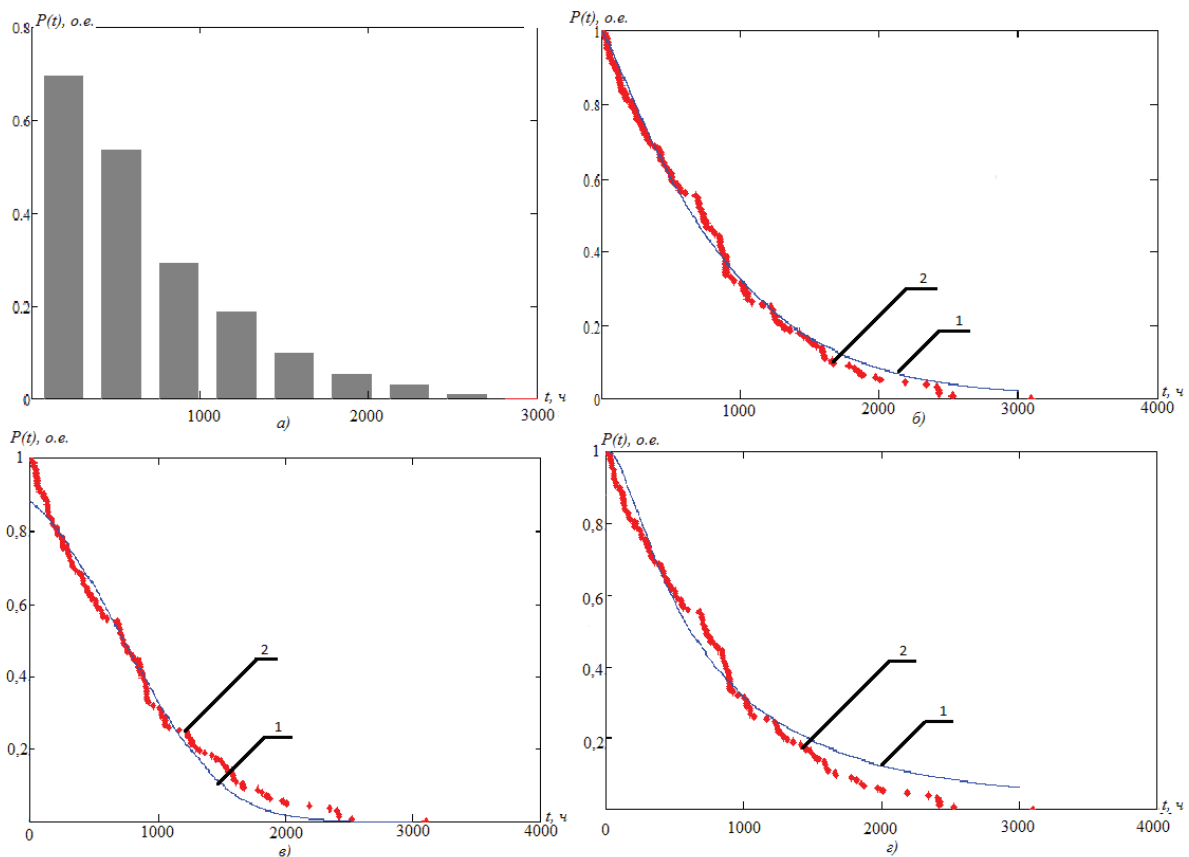


Рис. 2. Алгоритмы расчета показателей надежности

#### Выводы

1. Разработана компьютерная модель расчета количественных показателей эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, позволяющая оценить как электрический двигатель в целом, так и ротор, статор и подшипниковый узел в отдельности.



**Рис. 3.** Гистограмма и функция распределения вероятности безотказной работы (представлены для электрического двигателя в целом): а) гистограмма ВБР; б) функция ВБР – закона распределения Вейбулла; в) функция ВБР – нормальный закон распределения; г) функция ВБР – логнормальный закон распределения. 1 – теоретическое распределение вероятности безотказной работы; 2 – экспериментальное (расчетное) распределение вероятности безотказной работы

2. Представлена компьютерная модель количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, с применением методов статистического анализа, для трех законов распределения: нормального, логнормального и закона распределения Вейбулла, обладающая высокой точностью. Алгоритм реализован в вычислительном комплексе Mathcad, позволяет облегчить и ускорить процесс анализа надежности тяговых электрических двигателей.
3. Получены законы распределения эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов, количественная оценка показателей наработки на отказ, интенсивности отказа.
4. Представленные данные использованы для создания программно-вычислительного комплекса количественной оценки показателей надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Морозов А.А. Синий троллейбус // Рыбинские известия. – 2013. – № 2. – С. 3–4.
2. Метод и система определения надежности двигателя: пат. США № 6834256; заявл. 28.09.02; опубл. 31.05.04.
3. Дефорест Э. Управление двигателем и его надежностью // Энергия: Журнал детройтского научно-исследовательского института. – 2012. – Т. 124. – С. 14–15.
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
5. Михайлов И.Ю., Федянин А.Л. Особенности эксплуатации электрооборудования троллейбуса // Современные техника и технологии: Труды XVIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2012. – Т. 1. – С. 425–426.
6. Колегаев Р.Н. Экономическая оценка качества и оптимизации системы ремонта машин. – М.: Машиностроение. 1980. – 239 с.
7. Селиванов А.И. Основы старения машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 417 с.
8. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 176 с.
9. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 432 с.
10. Острейковский В.А. Теория надежности. 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2008. – 463 с.
11. Гусев В.В. Показатели безотказности электрических машин в реальных условиях эксплуатации алмазодобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 178–183.

12. Ведяшкин М.В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин в процессе эксплуатации // Электротехнические преобразователи энергии: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 17–19 октября 2007. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 49–51.
13. Ведяшкин М.В. Сбор и анализ данных по эксплуатационной надежности асинхронных двигателей // XV Международная научно-практическая конференция СТТ. – Томск, 4–8 мая 2009. – Т. 1. – С. 377–378.
14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
15. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. – М.: Наука, 1970. – 400 с.
16. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванев, В.М. Гостищев. – Донецк: УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.
17. Макаров Е.С. Mathcad учебный курс. – М.: МИР, 2009. – 468 с.
18. Глушаков С.В., Жакин И.А., Хачиров Т.С. Математическое моделирование MathCAD 2000, MatLab5. – Харьков: Фолио: АСТ, 2001. – 524 с.
19. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. – М.: Наука, 1996. – 206 с.

Поступила 04.12.2013 г.

UDC 621.333:004

## DEVELOPMENT OF COMPUTER MODEL FOR CALCULATING QUANTITATIVE ASSESSMENT OF TRACTION ELECTRIC MOTOR TROLLEYBUS RELIABILITY

**Ilya Yu. Mikhaylov,**

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: mihaylov\_ij@mail.ru

**Oleg P. Muravlev,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: mop@tpu.ru

**Aleksandr L. Fedyanin,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: feydanin@tpu.ru

*The authors have analyzed the failures of 47 trolleybuses at the Tomsk tram-trolley department and have revealed that 69,7 % of failures are operational. More than half of them relates to the failure of the electrical equipment, the most important part of which is the traction electric motor trolley. The urgency of the discussed issue is caused by frequent failures of trolley traction motors and the need to develop a set of measures to ensure the required level of reliability.*

**The main aim of the study** is to develop a mathematical model for statistical definition of quantitative assessment of operational reliability for traction electric motor trolley.

**The methods used in the study:** statistical methods for determining the quantitative assessment of operational reliability, the laws of distribution functions.

**The results:** The paper introduces the algorithm for determining the parameters of the mathematical model of operational reliability of trolley traction electric motor. The quantitative reliability indices of traction motor trolley, histogram and probability function of uptime normal, log-normal distribution law, and the law of the Weibull distribution were obtained by the proposed mathematical model.

**Conclusions:** For the first time the authors developed the computer model to calculate quantitative indicators of operational reliability of trolley traction electric motor, allowing estimating the electric motor as a whole, and the rotor, stator and bearings separately. The introduced and described computer model of quantitative assessment of operational reliability, using the methods of statistical analysis for three laws of distribution: normal, lognormal, and Weibull distribution law, is highly accurate. The algorithm is implemented in Mathcad and it can facilitate and expedite the reliability indicator identification and analysis of electric traction motor reliability. The authors obtained the distribution laws of operational reliability of trolleybus traction electric motors, quantitative estimation of time to failure, failure rate. The data given were used to develop the software and computing complex for quantitative assessment of trolleybus traction electric motor reliability.

### **Key words:**

*Trolleybus, reliability data, probability of no-failure operation, algorithm of determinate indicators reliability.*

### **REFERENCES**

1. Morozov A.A. Goluboy trolleybus [Blue trolley]. *Rybinskie izvestiya*, 2013, no. 2, pp. 3–4.
2. House M.B., Flickinger G.L. *Metod i sistema dlya opredeleniya nadezhnosti dvigatelya* [Method and system for determining motor reliability]. Patent USA, no. 6834256, 2004.
3. Deforest E. Upravlenie dvigatelem i ego nadezhnost [Managing motors and reliability]. *Energy: Detroit Institutes of Technology Scientific Magazines*, 2012, vol. 124, pp. 14–15.
4. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Foundations of the reliability theory]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2006. 704 p.



5. Mikhailov I.Yu, Fedyanin A.L. Osobennosti ekspluatatsii elektrooborudovaniya trolleybusa [Features of electrical trolley operation]. *Trudy XVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern equipment and technology: Proc. XVIII Intern. scientific and practical. conf. graduate students and young scientists]. Tomsk, 2012. Vol.1, pp. 425–426.
6. Kolegaev R.N. *Economicheskaya otsenka kachestva i optimizatsii sistemy remonta mashin* [Economic evaluation of the quality and optimization of machine repairing system]. Moscow, Engineering, 1980. 239 p.
7. Selivanov A.I. *Osnovi stareniya mashin* [Basis of machine aging]. Moscow, Engineering, 1971. 417 p.
8. Yamanov S.A., Yamanova L.V. *Starenie, stoykost i nadezhnost elektricheskoy izolyatsii* [Aging, durability and reliability of the electrical insulation]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 176 p.
9. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machines]. Moscow, Publishing House MEI, 2006. 432 p.
10. Ostreikovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability Theory]. Moscow, Nauka, 2008. 463 p.
11. Gusev V.V. Pokazateli bezotkaznosti elektricheskikh mashin v realnykh usloviyakh ekspluatatsiialmazodobyvayushchego kompleksa [Indicators of reliability of electrical machines in actual use of diamond-mining complex]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 178–183.
12. Vedyashkin M.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti elektricheskikh mashin v protsesse ekspluatatsii [Evaluation of technical condition and reliability of electrical machines in operation]. *Electromekhanicheskie preobrazovateli energii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electromechanical energy converters. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 2007. pp. 49–51.
13. Vedyashkin M.V. Sbor i analiz dannykh po ekspluatatsionnoy nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley [Data collection and analysis of operational reliability for asynchronous motors]. *XV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya STT* [Modern technique and technology. International scientific-practical conference]. Tomsk, 2009. pp. 377–378.
14. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i metamaticheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 2004. 479 p.
15. Gorskiy L.K. *Statisticheskie algoritmy issledovaniya nadezhnosti* [Statistical algorithms for reliability study]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 400 p.
16. Zakharchenko P.I., Shirnin I.G., Beneev B.N. Gostishchev V.M. *Obespechenie nadezhnosti asinkhronnykh dvigateley* [Ensuring the reliability of induction motors]. Donetsk, UkrNIIVE, 1998. 324 p.
17. Makarov E.S. *Mathcad uchebnyy kurs* [Mathcad course]. Moscow, Mir, 2009. 468 p.
18. Glushakov S.V. *Matematicheskoe modelirovanie MathCAD 2000, MatLab5* [Mathematical modeling of MathCAD 2000, MatLab5]. Harkov, Folio: AST, 2001. 524 p.
19. Larichev O.I., Moshkovich E.M. *Kachestvennyye metody prinyatiya resheniy* [Qualitative methods of decision-making]. Moscow, Nauka, 1996. 206 p.

УДК 621.314

## РАЗМЫКАТЕЛЬ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

**Пустынников Сергей Владимирович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: pustynnikov@list.ru

**Хохлова Татьяна Евгеньевна,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и электротехники  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: xoxlova@tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью применения различных видов коммутаций и принципов построения коммутирующих устройств для осуществления многократного размыкания сильноточных цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой.*

**Цель работы:** обосновать возможность использования предложенной модели размыкателя, выполняющего бездуговую коммутацию цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой.

**Методы исследования:** математическая модель расчета переходного процесса, позволяющая рассчитать ток в сильноточной цепи с индуктивной нагрузкой по параметрам размыкателя; виртуальное моделирование работы предложенной модели размыкателя.

**Результаты:** предложена модель размыкателя, способная отключать сильноточную цепь с индуктивной нагрузкой от источника постоянного тока при помощи размыкания слаботочной цепи. В процессе коммутации созданы условия, исключающие возможность появления дуги. Разработана математическая модель расчета тока в цепи нагрузки методом переменных состояния. Проведено математическое и виртуальное исследование работы модели размыкателя с заданными параметрами.

### Ключевые слова:

Сильноточные и слаботочные цепи, постоянный ток, ток нагрузки, размыкатель цепей постоянного тока, переходный процесс, метод переменных состояния.

Разнообразие требований, предъявляемых к коммутационной аппаратуре, определяет необходимость исследования и применения различных видов коммутации и принципов построения коммутирующих устройств. Все методы коммутации можно условно разделить на два основных направления: дуговая коммутация, сопровождающаяся возникновением дуги в контактной промежутке с последующим её гашением, и бездуговая коммутация, когда в процессе коммутации созданы условия, исключающие возможность появления дуги. В большинстве случаев коммутация цепей постоянного тока, содержащих индуктивную нагрузку или имеющих внутреннюю индуктивность – линий электропередач, линий связи, цепей с генераторами и двигателями постоянного тока и т. д., осуществляется при помощи электромеханических устройств – пускателей, контакторов и т. д., что сопровождается возникновением дуги на размыкающих контактах, а также перенапряжением на индуктивности, в 5–7 раз превышающем напряжение источника питания.

Один из способов бездуговой коммутации индуктивной нагрузки основан на увеличении индуктивности насыщенного дросселя при разряде конденсатора и образовании паузы тока, при которой происходит размыкание цепи [1]. Применяется также метод реостатной коммутации, основанный на перетекании тока из одной параллельной ветви в другую, при изменении сопротивления одной из ветвей. Наиболее известные устройства –

это взрывающиеся проводники и фольга. В этом случае изменение сопротивления происходит путем разрушения проводников. Бездуговая реостатная коммутация может быть осуществлена с помощью не разрушаемых термических нелинейных резисторов, изготавливаемых из стальной ленты марки ОЗКП. Сопротивление таких резисторов изменяется в десятки раз при изменении температуры жидкого азота до 700 °С. Известен также способ бездуговой коммутации сильноточных цепей постоянного тока, заключающийся в том, что в момент размыкания силовой цепи через коммутатор пропускается встречный импульс тока от дополнительного источника, причем импульс тока создается путем разряда заряженного конденсатора через двухобмоточный трансформатор [2].

Авторами разработана и исследована работа модели размыкателя сильноточной цепи постоянного тока с внутренней индуктивностью, или с индуктивной нагрузкой, позволяющая осуществлять многократное замыкание и размыкание таких цепей [3]. Схема предложенной модели показана на рис. 1.

Модель содержит:

- сильноточную цепь, состоящую из последовательно подключенных к постоянному источнику ЭДС  $E$  активно-индуктивного сопротивления нагрузки  $R_n$ ,  $L_n$ , вторичной обмотки трансформатора тока  $R_2$ ,  $L_2$  и коммутатора  $K_2$ . В качестве коммутатора  $K_2$  может быть включен тиристор, отключающий нагрузку от источника

ЭДС  $E$  при переходе тока нагрузки через нулевое значение. Параллельно нагрузке подключен вентиль  $VD$ , который шунтирует нагрузку при размыкании коммутатора  $K_1$ ;

- слаботочную цепь, состоящую из последовательно подключенных к тому же постоянному источнику ЭДС  $E$  первичной обмотки трансформатора тока  $R_1, L_1$ , ограничительного резистора  $R_3$  и коммутатора  $K_1$ .

Обмотки трансформатора тока включены встречно, причем  $L_1 \geq L_2$  и  $R_1 \geq R_2$ , а благодаря ограничительному сопротивлению  $R_3$  ток  $i_2$ , протекающий через нагрузку и вторичную обмотку трансформатора тока, в несколько раз превышает величину тока  $i_1$ , протекающего по первичной обмотке трансформатора тока. Предложенная схема позволяет осуществлять размыкание силовой цепи путем размыкания слаботочной цепи размыкателя.

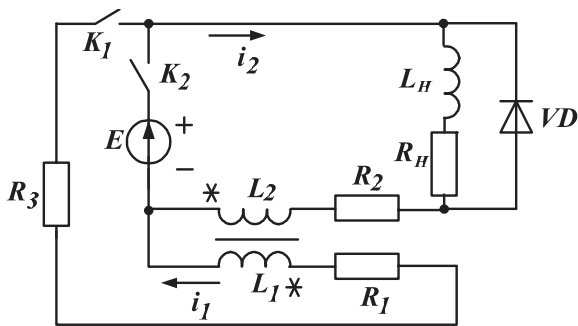


Рис. 1. Схема модели

При замыкании коммутатора  $K_2$ , постоянный источник ЭДС  $E$  подключается к нагрузке и по цепи источник ЭДС  $E$  – нагрузка  $R_n, L_n$  – вторичная обмотка  $R_2, L_2$  трансформатора тока протекает постоянный ток  $i_2$ . Одновременно замыкается коммутатор  $K_1$ , который подключает постоянный источник ЭДС  $E$  через резистор  $R_3$  к первичной обмотке трансформатора тока  $R_1, L_1$ , и по первичной обмотке протекает постоянный ток  $i_1$ , имеющий направление встречного включения относительно постоянного тока  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора тока, при этом величина тока  $i_1$ , ограниченная резистором  $R_3$ , в несколько раз меньше величины тока вторичной обмотки  $i_2$ .

Для отключения нагрузки  $R_n, L_n$  от ЭДС  $E$  размыкается коммутатор  $K_1$  и ток  $i_1$  в первичной обмотке трансформатора тока уменьшается до нуля. За счет индуктивной связи  $M$  при встречном включении обмоток трансформатора тока во вторичной обмотке трансформатора тока  $R_2, L_2$  ток  $i_2$  переходит через нулевое значение, благодаря чему формируется отрицательный импульс тока, во время которого происходит размыкание коммутатора  $K_2$ , отключающего нагрузку от постоянного источника ЭДС  $E$ .

В первый момент времени  $t=0_+$  после размыкания коммутатора  $K_1$  энергия, запасенная индуктивностью  $L_n$  нагрузки, шунтируется вентилем  $VD$  и нагрузка не оказывает влияния на переходный

процесс в остальной цепи. Работа предложенной модели, состоящая из процесса формирования отрицательного импульса тока  $i_2$  силовой цепи и процесса его установления, описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений [4], где размыкание коммутатора  $K_1$  эквивалентно последовательному включению в соответствующий участок цепи сопротивления  $R_k$ , имеющего большое сопротивление. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt} + i_1 \cdot (R_1 + R_3 + R_k) = E; \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - M \cdot \frac{di_1}{dt} + i_2 \cdot R_2 = E. \end{cases}$$

Начальные значения токов:

$$i_1 = E / (R_1 + R_3), \quad i_2 = E / (R_2 + R_n)$$

Взаимная индуктивность  $M = K_{cb} \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ , где  $K_{cb}$  – коэффициент связи обмоток,  $0 \leq K_{cb} \leq 1$ .

Полученную систему дифференциальных уравнений решаем непосредственно при помощи метода переменных состояния, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в виде [5]:

$$\left( \frac{dx}{dt} \right) = (A)(x) + (B)(V),$$

где  $(x)$  – матрица-столбец переменных состояния;  $(A)$  – матрица состояния;  $(V)$  – матрица-столбец источников энергии;  $(B)$  – матрица коэффициентов при источниках;  $(dx/dt)$  – матрица-столбец первых производных по времени от переменных состояния.

Таким образом, получаем:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L_2 \cdot (R_1 + R_3 + R_k)}{M^2 - L_1 \cdot L_2} & \frac{M \cdot R_2}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \\ \frac{M \cdot (R_1 + R_3 + R_k)}{M^2 - L_1 \cdot L_2} & \frac{L_1 \cdot R_2}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{L_2 + M}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \\ -\frac{L_1 + M}{M^2 - L_1 \cdot L_2} \end{pmatrix} E.$$

Аналитическое решение уравнений состояния в общем виде записывается:

$$(x) = (x_{cb}) + (x_{np}),$$

где  $(x_{cb}) = (x_0)e^{(A)t}$  – реакция цепи, обусловленная ненулевыми начальными условиями при отсутствии внешнего воздействия;  $(x_0)$  – матрица-столбец начальных условий переменных состояния;

$$(x_{np}) = \int_0^t e^{(A)(t-\tau)} (B)(V) d\tau$$
 – реакция цепи от внешних воздействий при нулевых начальных условиях;  $e^{(A)t}$  – матричная экспоненциальная функция, представляющая собой медленно сходящийся ряд. Определение коэффициентов этого ряда – три-

доемкий и громоздкий процесс. Поэтому для решения полученной системы применяем численный метод Рунге–Кутты, основанный на разложении переменных состояния в ряд Тейлора и учете его первых двух членов:

$$(x_{k+1}) = (x_k) + h(dx/dt),$$

где  $(x_k)$  – матрица-столбец переменных состояния для  $k$ -го шага;  $h$  – шаг интегрирования по времени.

Методическая погрешность данного алгоритма пропорциональна  $h^5$ , а уменьшение шага приводит к увеличению точности, но с ростом числа шагов погрешность может увеличиваться за счет погрешности округления [6].

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования предложенной модели размыкания сильноточной цепи, проведенного в пакете программ MathCad для схемы с параметрами:

$$E = 100 \text{ В}, L_1 = 1 \text{ Гн}, R_1 = 1 \text{ Ом}, R_3 = 4 \text{ Ом},$$

$$R_k = 100 \text{ кОм}, L_2 = 0,01 \text{ Гн}, R_2 = 0,15 \text{ Ом},$$

$$R_n = 0,84 \text{ Ом}, L_n = 5 \text{ Гн}, K_{cb} = 0,8.$$

Установившиеся значения токов до размыкания  $i_1=20 \text{ А}$ ,  $i_2=100 \text{ А}$ .

Дифференциальные уравнения состояния цепи:

$$\begin{pmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -5 \cdot 10^8 & -7,55 \cdot 10^3 \\ -5 \cdot 10^9 & -7,55 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5,5 \cdot 10^4 \\ 5,5 \cdot 10^5 \end{pmatrix} \cdot 100.$$

Матрица-столбец начальных условий:

$$(x_0) = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix}.$$

По результатам моделирования получили: ток в сильноточной цепи размыкателя практически мгновенно переходит через нулевое значение и его минимальное значение  $i_{2\min} = -58 \text{ А}$ . В момент времени  $t_1$  ток  $i_2$  вновь переходит через нулевое значение и длительность отрицательной части импульса тока составляет  $\Delta t = 5,7 \text{ мс}$ . На интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$  происходит размыкание коммутатора  $K_2$  и отключение нагрузки от источника ЭДС  $E$ .

На рис. 3 представлены результаты виртуального моделирования предложенной модели размыкания сильноточной цепи с помощью программы Multisim для схемы с параметрами: ЭДС  $E=100 \text{ В}$ ,

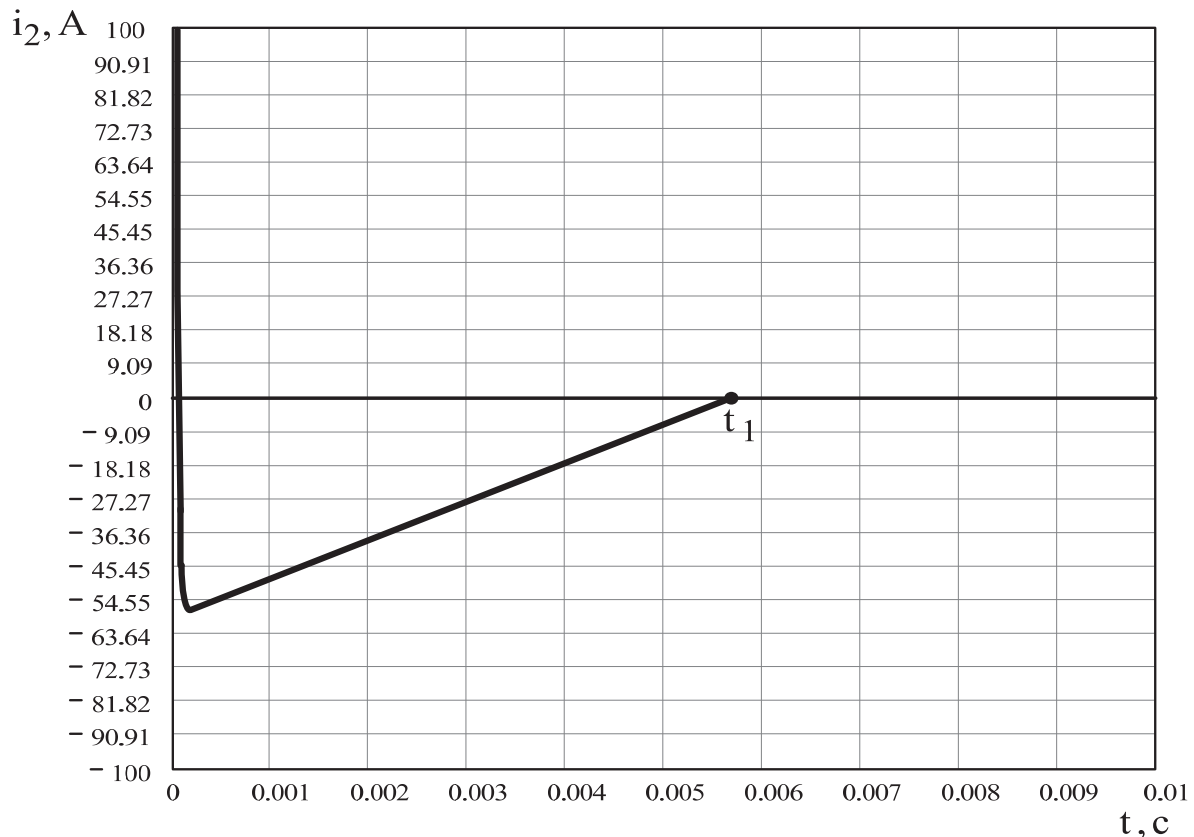


Рис. 2. Ток сильноточной цепи при работе модели размыкателя



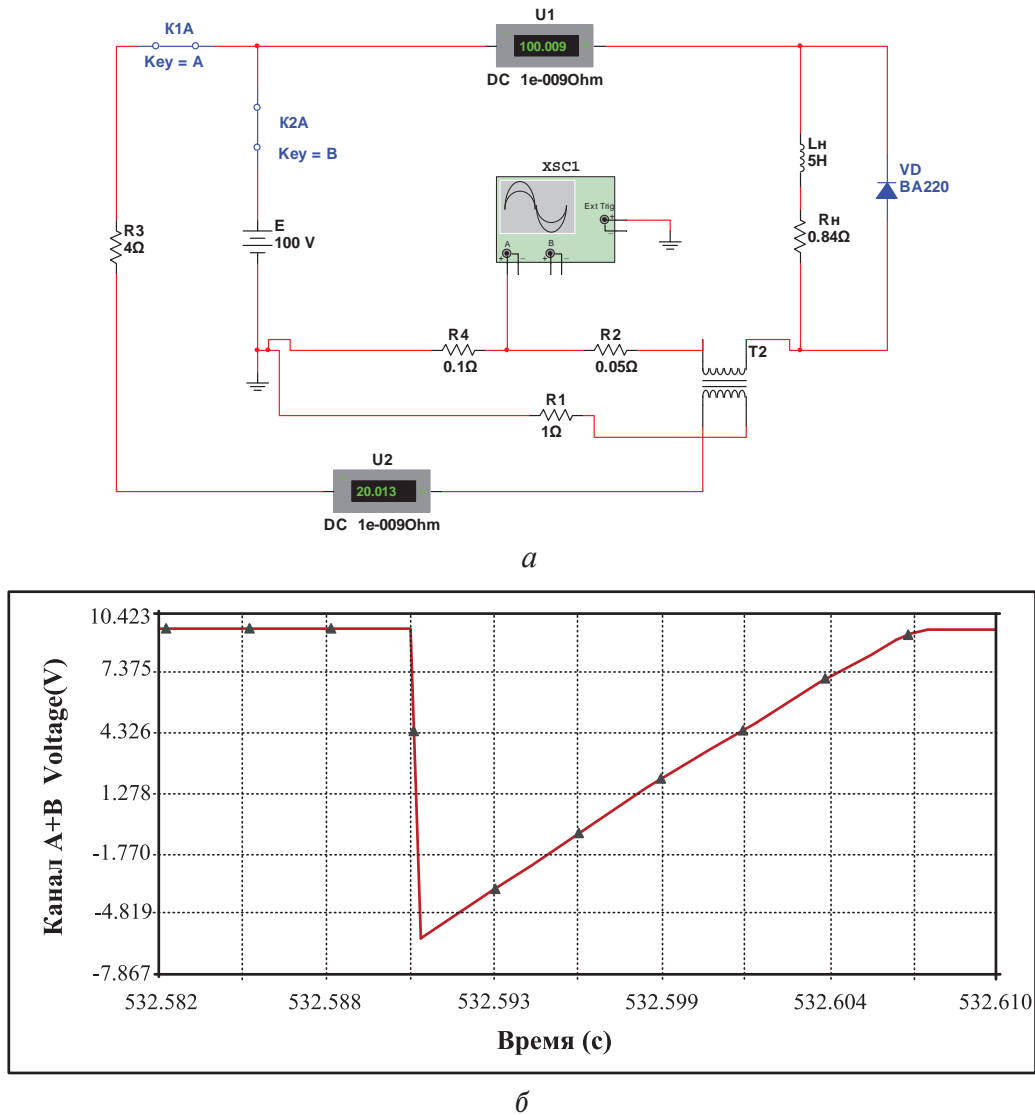


Рис. 3. Виртуальное моделирование: а) схема модели; б) график напряжения на резисторе  $R_4=0,1$  Ом

индуктивность первичной обмотки трансформатора тока  $L_1=1$  Гн, активное сопротивление первичной обмотки  $R_1=1$  Ом, индуктивность вторичной обмотки  $L_2=0,01$  Гн, активное сопротивление вторичной обмотки  $R_2=R_{21}+R_{22}=0,15$  Ом,  $K_{cb}=0,8$  сопротивление ограничительного резистора  $R_3=4$  Ом, параметры нагрузки:  $R_H=0,84$  Ом,  $L_H=5$  Гн.

Результаты исследования показали, что ток нагрузки при размыкании коммутатора  $K_1$  переходит через нулевое значение и достигает величины  $i_{2min}=-55,4$  А, длительность отрицательной части импульса тока составляет  $\Delta t=5,4$  мс что практически совпадает с результатами расчета.

На рис. 4 представлены результаты виртуального моделирования предложенной модели размыкателя силовоточной цепи с помощью программы Multisim для схемы с тиристором, который включен вместо коммутатора  $K_2$ .

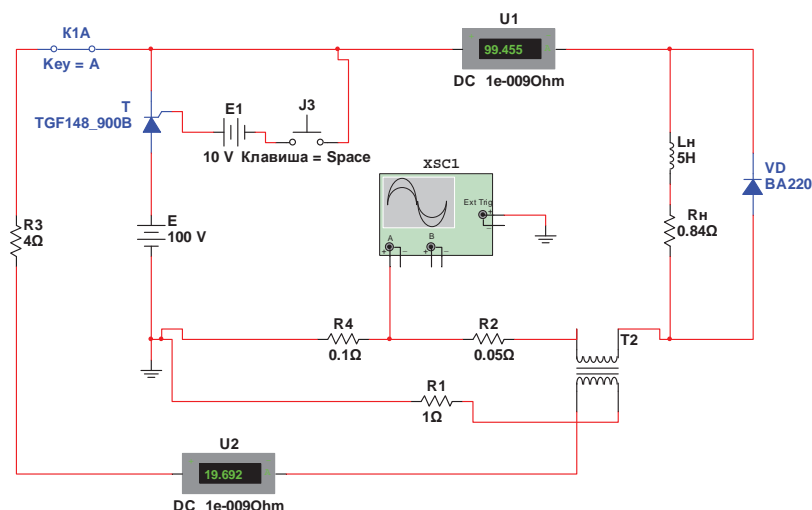
Результаты исследования показали, что ток нагрузки при размыкании коммутатора  $K_1$  переходит через нулевое значение и достигает величины

$i_{1min}=24,4$  А, длительность отрицательной части импульса тока составляет  $\Delta t=2,6$  мс, что является достаточным для надежного запирающего силового тиристора. Различие в величине и длительности отрицательной части импульсов тока на рис. 3, б и 4, б объясняется нелинейностью вольтамперной характеристики тиристора.

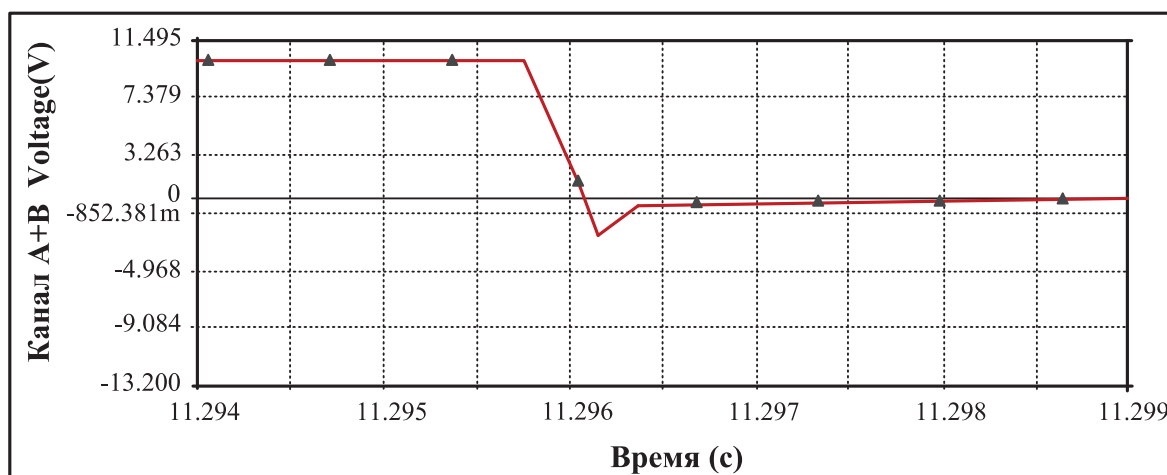
Таким образом, предложенная модель размыкателя силовоточной цепи способна осуществить отключение силовоточной цепи с индуктивной нагрузкой и током  $i_2=100$  А от источника постоянного тока при помощи размыкании слаботочной цепи, величина тока которой в 5 раз меньше  $i_1=20$  А.

#### Выводы

1. Разработан размыкатель цепей постоянного тока, способный коммутировать силовоточные цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой путем размыкания слаботочной цепи постоянного тока, величина которого в несколько раз меньше тока нагрузки.



а



б

Рис. 4. Виртуальное моделирование: а) схема модели; б) график напряжения на резисторе  $R_4=0,1$  Ом

2. Разработана математическая модель расчета переходного процесса методом переменных состояния, позволяющая рассчитать ток в силовой цепи по параметрам размыкателя.
3. Проведено виртуальное исследование работы модели размыкателя с заданными параметрами, которое подтвердило результаты математического моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 96 с.
2. Способ коммутации в силовых цепях постоянного тока: пат. Рос. Федерация № 2299487; заявл. 22.09.05; опубл. 20.05.07, Бюл. № 14. – 2 с.
3. Бесконтактный размыкатель цепей постоянного тока: пат. Рос. Федерация № 120826; заявл. 23.04.12; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. – 2 с.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Теоретические основы электротехники: в 3 т. Т. 2 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
6. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

Поступила 08.11.2013 г.

UDC 621.314

## A BREAKER OF HIGH CURRENT DC CIRCUITS WITH INDUCTIVE LOAD

**Sergey V. Pustynnikov,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: pustynnikov@list.ru

**Tatyana E. Khokhlova,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: xoxlova@tpu.ru

*The urgency of the discussed issue is caused by the necessity of applying different types of switching and principles of construction of switching devices, performing multiple tripping in DC circuits with inductive load.*

**The main aim of the study:** *to justify the use of the proposed model contactless switch in DC circuits with inductive load performing arcless switching.*

**The methods used in the study:** *a mathematical model for calculating the transition process, which allows calculating the current in high-current circuit of the used parameters of contactless switch.*

**The results:** *the authors introduced the model of contactless switch in DC circuits with inductive load. A mathematical model for calculating the transients by the method of state variables has been developed. It allows calculating the current in the load circuit using parameters of contactless switch. The authors held as well the mathematical and the virtual modeling of operation of the model with the given parameters of contactless switch.*

### **Key words:**

*High-voltage and low-voltage current circuit, direct current, load current, DC circuit breaker, transients, state variable method.*

### **REFERENCES**

1. Pichugina M.T. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulsed power engineering]. Tomsk, TPU Publ. house, 2005. 96 p.
2. Egorov O.G. *Sposob kommutatsii v silnotochnykh tsepyakh postoyannogo toka* [Switching method in high-current DC]. Patent RF, no. 2299487, 2007.
3. Pustynnikov S.V. *Bezkontaktny razmykatel tsepey postoyannogo toka* [The contactless switch in DC circuits]. Patent RF, no. 120826, 2012.
4. Zeveke G.V., Ionkin P.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Eneroatomizdat, 1989. 528 p.
5. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Checherin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. St. Petersburg, Piter, 2003. Vol. 2, 576 p.
6. Ortega Dzh., Pul U. *Vvedenie v chislennye metody resheniya differentsialnykh uravneniy* [Introduction to numerical methods for solving differential equations]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p.

УДК 621.311.001.57

## РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЗАДАЧ ВСЕРЕЖИМНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Прохоров Антон Викторович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: antonprokhorov@tpu.ru

**Васильев Алексей Сергеевич,**

канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: vasilevas@tpu.ru

**Рубан Николай Юрьевич,**

ассистент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: rubanny@tpu.ru

**Уфа Руслан Александрович,**

ассистент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: hecn@tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска новых методов и средств получения информации, требуемой для оценки взаимного влияния высоковольтных систем постоянного и переменного тока.*

**Цель работы:** разработка и исследование гибридной модели высоковольтной передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения, обеспечивающей совместное моделирование в реальном времени силового оборудования, а также систем управления, защиты и автоматики преобразовательного комплекса.

**Методы исследования:** аналитические методы исследования; теория методов дискретизации; методы теории автоматического регулирования и управления; методы теории точности и чувствительности вычислительных устройств; концепция гибридного моделирования; использование программных и программно-технических средств моделирования Multisim 11, Matlab Simulink и Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем.

**Результаты:** согласно сформированным требованиям к математическим моделям силового оборудования преобразовательного комплекса, а также средствам их решения, была разработана гибридная модель высоковольтного преобразовательного комплекса на базе преобразователя напряжения, а также выполнены ее экспериментальные исследования, результаты которых подтверждают реализацию требуемых свойств модели и эффективность предложенного решения.

**Ключевые слова:**

*Высоковольтные передачи постоянного тока, моделирование, релейная защита и автоматика, системы реального времени, силовая электроника.*

В настоящее время все больше перспективных схем развития электроэнергетических систем предусматривают использование высоковольтных передач постоянного тока (ВППТ) [1]. Это связано как с достигнутым уровнем прогресса в области силовой полупроводниковой техники, позволившим уменьшить стоимость силовых преобразователей и повысить экономическую эффективность строительства новых ВППТ, так и с усложнением структуры и механизмов управления современных энергосистем. Среди многочисленных достижений в области высоковольтной силовой электроники особые ожидания связаны с применением преобразователей напряжения (ПН) на управляемых силовых ключах (тиристорах и транзисторах), обладающих высоким быстродействием и

предоставляющих возможность независимого регулирования активной и реактивной мощности в квазиустановившихся и переходных режимах, что обеспечивает не только более комплексные решения задач несинхронного объединения энергосистем, например, за счет использования много-терминальных ВППТ [2], но и улучшение устойчивости и повышение управляемости передач переменного тока посредством включения на параллельную работу с ними вставок и линий постоянного тока.

Однако вместе с появлением сложных гибридных систем постоянного и переменного тока повышается трудоемкость разработки и настройки их систем управления, релейной защиты и автоматики (СУРЗА), а также оценки их взаимного влияния.



### Вопросы настройки и функционирования систем управления, релейной защиты и автоматики высоковольтных систем постоянного тока

Защита преобразовательной подстанции ВППТ представляет собой сложную многоуровневую синхронизированную систему. Кроме того, для защиты ВППТ необходимо обеспечить выполнение повышенных требований к надежности и быстродействию. Для удовлетворения первого требования защита имеет строгую иерархию, причем функционирование каждого элемента резервируется. Что касается быстродействия, то данное требование является критическим, поскольку преобразователи обладают низкой перегрузочной способностью [3, 4]. В случае возникновения короткого замыкания или перенапряжения на стороне постоянного тока срабатывание защиты должно происходить в течение нескольких микросекунд. Поэтому для обеспечения высокой скорости блокирования силовых вентилях преобразователя используются аппаратные схемы защиты. В то же время, наряду с аппаратной защитой ВППТ существует ряд программных защит, имеющих более сложные алгоритмы. Однако их скорость функционирования зависит от синхронизирующего импульса (такта) работы СУРЗА ВППТ и потому ограничена в пределах сотен микросекунд. При наличии высоковольтной линии передачи постоянного тока наряду с упомянутыми выше способами применяется метод бегущей волны, основанный на контроле волн тока и напряжения, появляющихся на линии при возникновении КЗ. Недостатком такого метода является низкая чувствительность к высокоомным замыканиям, поэтому в случае использования защиты на этом принципе действия необходимо ее резервирование, например, с помощью дифференциальной защиты [5]. Данный принцип применим для сравнения токов по концам ВППТ как на стороне постоянного, так и на стороне переменного тока. Недостатком дифференциальной защиты является сравнительно малое быстродействие по сравнению с защитами преобразователя и невозможность ее использования в многотерминальных системах [6, 7]. Реализация защиты многотерминальной системы постоянного тока возможна двумя путями:

- 1) с использованием силовых выключателей постоянного тока [8];
- 2) методом «квитирования» с совместным использованием выключателей переменного тока и быстрых механических ключей, установленных на ВППТ с каждой стороны [9].

Первый способ более дорогой и находит применение в сетях низкого напряжения, поскольку выключатели постоянного тока обладают низкой перегрузочной способностью.

Во втором случае алгоритм работы защиты предполагает достаточно сложную последовательность операций: блокировку всех преобразователей, выявление поврежденного элемента, неселективное отключение системы от сети переменного тока, отделение поврежденного элемента с помо-

щью быстрых механических ключей при отсутствии рабочего напряжения, и последующее восстановление питания. Поэтому время действия защиты многотерминальной ВППТ составляет порядка 0,7 секунд от момента возникновения замыкания до полного восстановления питания неповрежденной части системы. При этом существует проблема полного отключения сети постоянного тока на указанное время действия защиты [10], что может привести к нарушению устойчивой работы сетей переменного тока. Это требует разработки сложных быстродействующих алгоритмов централизованного управления многотерминальной системой в нормальных, аварийных и послеварийных режимах работы.

Наличие ВППТ в энергосистеме требует пересмотра традиционных подходов к построению и настройке релейной защиты силового оборудования переменного тока. Так, например, согласно [10] при возникновении ошибок коммутации вентилях ВППТ наблюдаются неправильные действия дистанционной защиты линий электропередачи переменного тока прилегающей сети. Возможным решением проблемы является оптимизация существующих алгоритмов функционирования релейных защит сетей переменного тока, подверженных воздействиям со стороны ВППТ, либо использование защит с другим принципом действия. В [11] авторы предлагают использовать вместо дистанционного дифференциальный принцип защиты прилегающих к ВППТ линий. Однако применение дифференциальной защиты ограничено длиной защищаемой линии и необходимостью наличия волоконно-оптических каналов связи. Поэтому в некоторых случаях в качестве основной защиты линии может потребоваться установка либо дифференциально-фазной, либо направленной высокочастотной защиты. В то же время примеры результатов анализа работы данных типов защит вблизи ВППТ неизвестны.

Вместе с появлением ПН все большее внимание стало уделяться применению ВППТ для регулирования напряжения и демпфирования низкочастотных колебаний мощности в сети переменного тока [12]. В связи с этим повышенную актуальность приобрели задачи разработки оптимальных алгоритмов управления быстродействующими ПН и согласования настроек их систем управления с настройками автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.

Из сказанного выше следует, что для анализа взаимного влияния высоковольтных систем постоянного и переменного тока и решения задач настройки их СУРЗА требуется наличие детальной и комплексной информации об условиях протекания всего спектра быстрых (от нескольких микросекунд) и медленных (до десятков секунд и даже минут) процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС). Таким образом, именно наличие достоверных методов и средств получения такого рода информации является необходимым условием надежного развития ВППТ и ЭЭС в целом.

### Методы и средства анализа взаимного влияния систем постоянного и переменного тока

Основными источниками информации, необходимой для анализа условий работы ЭЭС, являются информационно-измерительные комплексы (ИИК) и системы моделирования. Изучение опыта применения их в практике проектирования и эксплуатации ЭЭС позволяет определить достоинства и недостатки обоих и выявить перспективные направления развития методов и средств анализа работы ЭЭС.

В качестве одного из наиболее ярких примеров применения ИИК для анализа работы ЭЭС, содержащих ВППТ, может быть рассмотрен опыт Южной ЭЭС Китая [13]. Накопленные за несколько лет данные об аварийных отключениях ВППТ, заканчивающихся каскадными авариями и делением ЭЭС, позволили китайским инженерам скорректировать работу СУРЗА гибридной передачи постоянного и переменного тока и предотвратить развитие аварий при аналогичных возмущениях в будущем.

Следует отметить недостатки используемого подхода, свойственные всем случаям применения ИИК: высокая трудоемкость, связанная с анализом осциллограмм аварийных процессов в условиях низкой наблюдаемости ЭЭС, ограниченная применимость результатов измерений для настройки СУРЗА ВППТ в случаях реконфигурации данной ЭЭС или в других ЭЭС, возникновение ранее не наблюдавшихся возмущений, существования широкого диапазона возможных предаварийных режимов, а также большие временные затраты ввиду невозможности проведения масштабных экспериментов в ЭЭС.

В связи с указанными недостатками, ИИК не могут рассматриваться в качестве основного источника информации для анализа взаимного влияния ВППТ и ЭЭС переменного тока. Данные, получаемые от ИИК, могут быть в большей степени полезны для верификации результатов моделирования ЭЭС.

При этом достоверность и полнота результатов моделирования будет зависеть от выбранных методов и средств моделирования.

В настоящее время для анализа работы ЭЭС в основном применяются цифровые моделирующие комплексы. Вместе с тем их общим недостатком, ограничивающим спектр задач, решаемых с помощью отдельного комплекса, является использование численных методов интегрирования, основанных на представлении от природы непрерывных процессов в дискретном виде. Указанная особенность цифровых систем моделирования в конечном итоге приводит к необходимости различных форм декомпозиции моделируемых процессов, поиску компромиссов между дифференциальным порядком моделируемой ЭЭС, временем моделирования и возможностями применяемых методов и средств.

Так, для того чтобы проанализировать протекание процесса, возникающего в результате пропуска управляющего сигнала полупроводникового вентиля, приводящего к несимметричному режиму работы ПН и появлению осцилляций мощности в ЭСС, с последующим демпфированием возникших колебаний, необходимо обеспечить расчет с малым шагом интегрирования (1–5 мкс), что соответствует времени изменения состояния полупроводникового ключа, и на длительном интервале времени – порядка нескольких минут, необходимых для демпфирования колебаний [13]. Подобный расчет требует значительных вычислительных ресурсов в случае моделирования ЭЭС большой размерности и/или в реальном времени, например, для задач тестирования и настройки СУРЗА ВППТ.

Поэтому для решения подобного рода задач применяются многопроцессорные моделирующие системы реального времени, такие как RTDS, HYPERSIM [14, 15] и др.

Данные комплексы успешно зарекомендовали себя при моделировании электромагнитных переходных процессов и тестирования СУРЗА в замкнутом цикле.

Однако их использование для моделирования больших ЭЭС связано с рядом особенностей, возникающих ввиду имеющихся ограничений на дифференциальный порядок уравнений, решаемых одним процессором. Вследствие этого необходимым является разделение модели ЭЭС на участки и применение модели линии с распределенными параметрами для связи участков, закрепленных за отдельными процессорами. При этом ограничением на применение данного решения является требование к длине моделируемой линии, так как время распространения волны по линии должно быть больше или равно шагу интегрирования, что не всегда достижимо при малых длинах линии или использовании эквивалентов нескольких параллельных линий [16].

Кроме того, необходимость распределения моделей между отдельными процессорами ограничивает количество элементов, которые могут быть подключены к одному узлу и приводит к вынужденному эквивалентированию.

Указанные ограничения цифровых систем моделирования особенно явно проявляются при необходимости моделирования многотерминальных ВППТ и многоуровневых схем преобразователей, например 48-ми импульсных или каскадных схем [17], содержащих большое количество узлов и элементов, а также короткие связи в пределах подстанции.

Таким образом, несмотря на достоинства применения цифровых средств моделирования для решения отдельных задач анализа ЭЭС, существует необходимость поиска альтернативных подходов к моделированию, обеспечивающих комплексное решение задач, с учетом современных тенденций развития ВППТ.

### Концепция и средства гибридного моделирования энергосистем

Для выполнения комплекса современных требований к системам моделирования и моделям ЭЭС в Томском политехническом университете были разработаны концепция и средства гибридного моделирования, основанные на использовании трех подходов к построению моделей: аналогового, цифрового и физического, каждый из которых обеспечивает достижение максимальных свойств в решении отдельных подзадач. В результате объединения указанных подходов был создан всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС, отвечающий следующей совокупности требований: отсутствие декомпозиции процессов, ограничение на размер моделируемой ЭЭС и дифференциальный порядок моделей оборудования, на длительность моделируемых процессов, а также обеспечение реального времени моделирования. Универсальность концепции и модульность структуры средств гибридного моделирования, подробно описанных в [18], позволяет выполнить разработку модели любого элемента ЭЭС, в том числе ВППТ, и интегрировать ее в ВМК РВ ЭЭС.

Основными элементами ВМК РВ ЭЭС, отвечающими за воспроизведение в реальном времени моделей силового оборудования и его СУРЗА, являются специализированные гибридные процессоры (СГП). Все СГП имеют унифицированную многоуровневую структуру, представленную на рис. 1, б.

При этом индивидуальные особенности отдельного вида оборудования учитываются на этапе проектирования СГП, посредством синтеза аналоговой схемы решения его системы дифференциальных уравнений. В свою очередь модели СУРЗА реализуются на уровне центрального и периферий-

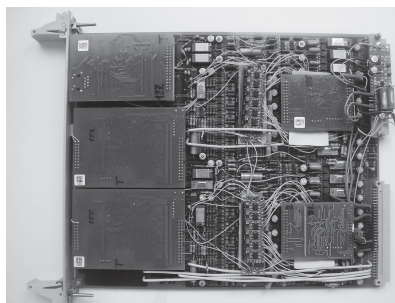
ных процессоров или сервера в зависимости от требуемого состава входных сигналов и скорости исполнения алгоритмов.

Описанная архитектура ВМК РВ ЭЭС определяет следующие требования к разработке моделей энергетического оборудования:

- универсальность модели. Один СГП должен воспроизводить различные модификации и типы одного вида силового оборудования. Например, модель электрической машины может использоваться для моделирования турбо-, гидро-, ветрогенераторов, синхронных и асинхронных двигателей.
- структурность модели. Оптимальное распределение моделей подсистем силового оборудования по различным уровням ВМК РВ ЭЭС в соответствии со свойствами реального оборудования. Например, реализация моделей силового оборудования осуществляется на аналоговом микроэлектронном уровне, а систем измерения, защиты и управления – в цифровой форме на уровне микропроцессоров.

Применение данного подхода для разработки гибридной модели ВППТ позволяет получить следующие ключевые преимущества:

- моделирование в реальном времени без ограничения на длительность воспроизведения процессов;
- моделирование ВППТ на базе любых типов преобразователей и при любой конфигурации преобразовательной подстанции, в том числе, имеющих многоуровневые и многотерминальные схемы;
- возможность взаимодействия модели с внешними устройствами и системами в замкнутом цикле и в режиме реального времени для задач тестирования СУРЗА;



а



б

**Рис. 1.** а) опытный образец СГП ВППТ; б) структурная схема гибридных программно-технических средств моделирования: ЦП – центральный процессор; ПАЦП 1 и ПАЦП 2 – процессоры аналого-цифровых преобразователей; ПК 1 и ПК 2 – процессоры коммутации; ГСП 1 и ГСП 2 – гибридные сопроцессоры; ЦУАК 1 и ЦУАК 2 – цифруемые аналоговые ключи; МУ – измерительный преобразователь;  $t_{\max}$  – время задержки в цифровом канале



- воспроизведение единого спектра электромагнитных и электромеханических процессов в ЭЭС для задач анализа взаимного влияния ВППТ и систем переменного тока.

**Результаты разработки и тестирования гибридной модели высоковольтных передач постоянного тока**

В соответствии с унифицированной структурой СГП модели силового оборудования преобразовательной подстанции: преобразовательного трансформатора, фильтро-компенсирующих устройств, реакторов и конденсаторных батарей, реализуются на базе аналоговых микросэлектронных схем. Модель СУРЗА верхнего уровня преобразовательной подстанции выполняется на уровне центрального процессора или сервера, а алгоритмы СУРЗА преобразователя и отдельных вентилях на уровне периферийных процессоров. В свою очередь модель силового преобразователя выполняется на физическом уровне. При этом адекватность модели полупроводникового вентиля и преобразователя в целом будет определяться погрешностями модели на физическом и цифровом уровнях. Физическая модель вентиля представляет собой цифруправляемый аналоговый ключ (ЦУАК). Для того чтобы обеспечить подобие физической модели реальному устройству, на цифровом уровне реализуются алгоритмы коммутации ключа в зависимости от значений тока и напряжения на его входе и выходе, а также сигнала управления на управляющем электроде. Таким образом, в зависимости от выбранного алгоритма управления цифруправляемый ключ может имитировать работу любого типа силового ключа (диода, полностью управляемого тиристора, биполярного транзистора с изолированным затвором), а также пары встречно-параллельных ключей разных типов, рис. 2. Кроме

того, на цифровом уровне реализуются алгоритмы формирования управляющих импульсов.

Погрешности модели на физическом уровне определяются различием физических характеристик силовых вентилях и ЦУАК, которые могут рассматриваться как идеальные ключи. Погрешность модели ключа на цифровом уровне в основном определяется временными задержками в информационно-измерительном канале (рис. 1, б):

$$t_{\max} = t_{\text{АЦП}} + t_{\text{АЛГОР}} + t_{\text{ПЕР}} \approx 50 \text{ мкс},$$

где  $t_{\text{АЦП}}$  – время аналого-цифрового преобразования данных в периферийном процессоре, с;  $t_{\text{ПЕР}}$  – время передачи данных от ПАЦЦ до ПК, с;  $t_{\text{АЛГОР}}$  – время выполнения алгоритмов управления и решения математической модели, с.

Для моделей современных высоковольтных преобразователей, частота коммутации которых не превышает 1000 Гц, указанной задержкой можно пренебречь.

Для оценки адекватности воспроизведения максимально полного спектра процессов при моделировании ВППТ на этапе разработки СГП была проведена оценка частотных характеристик его отдельных элементов при различных задаваемых параметрах моделей по схемам замещения (СГП предусматривает возможность гибкого изменения в реальном времени параметров модели за счет использования цифро-аналоговых преобразователей [18]). Так, для моделей фильтра и реактора, смоделированных в специализированном программном комплексе Multisim согласно их функциональным схемам (рис. 3) и с учетом используемой микросэлектронной компонентной базы с помощью встроенных программных средств анализа принципиальных схем были получены экспериментальные частотные характеристики (рис. 4–6).

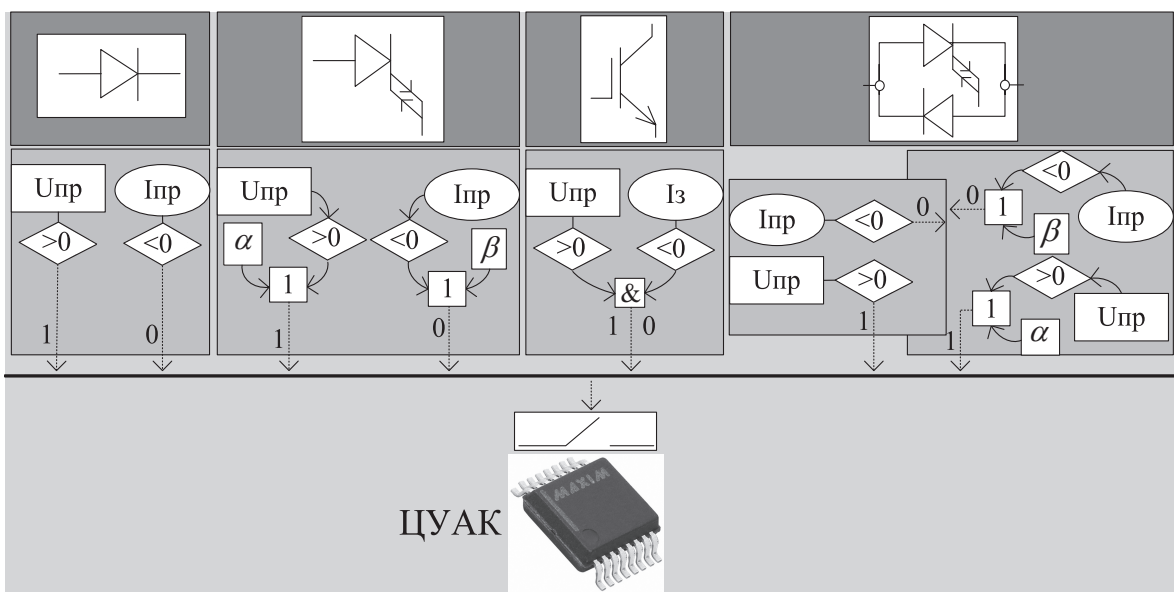


Рис. 2. Схема реализации алгоритмов управления силовых ключей в ЦУАК



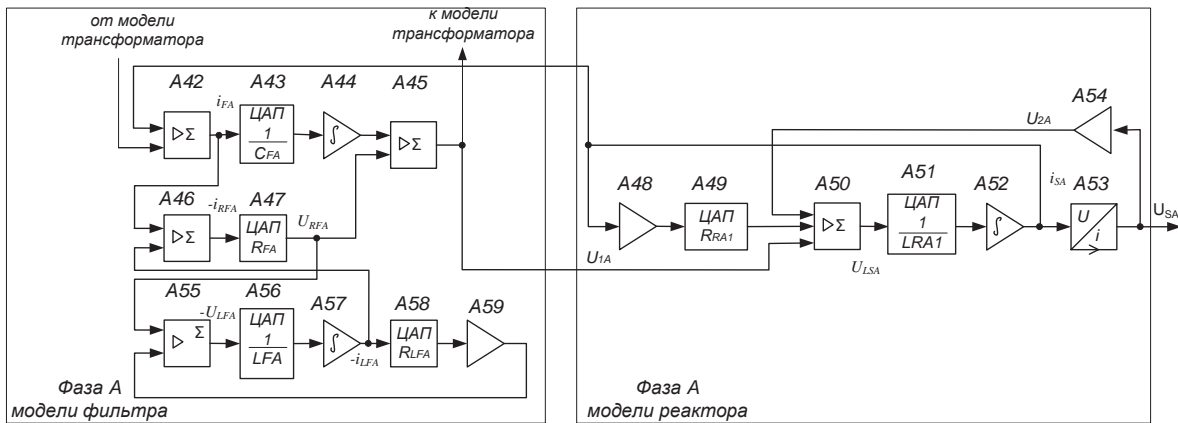


Рис. 3. Функциональная схема модели фильтра и реактора фазы А преобразовательного блока

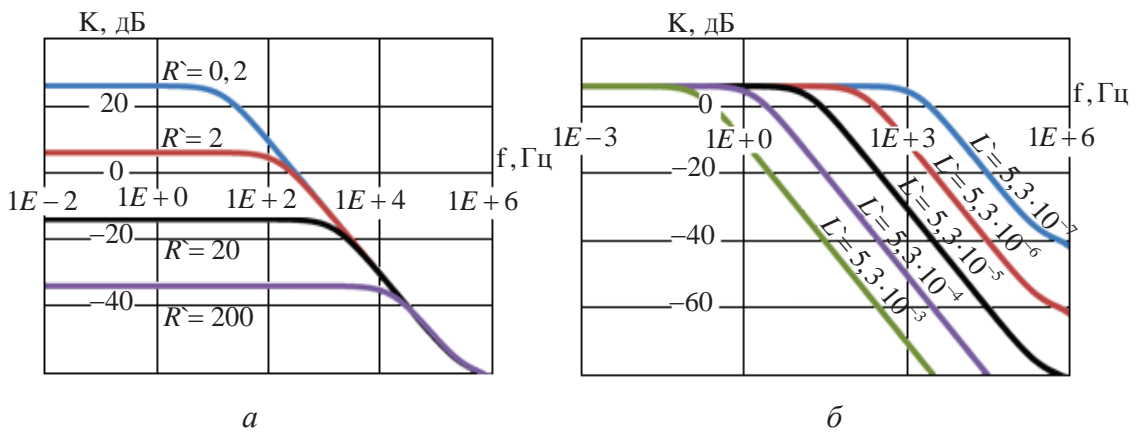


Рис. 4. АЧХ реактора: а) при неизменном значении  $L=3,123$  мГн; б) при неизменном значении  $R=11,8$  Ом

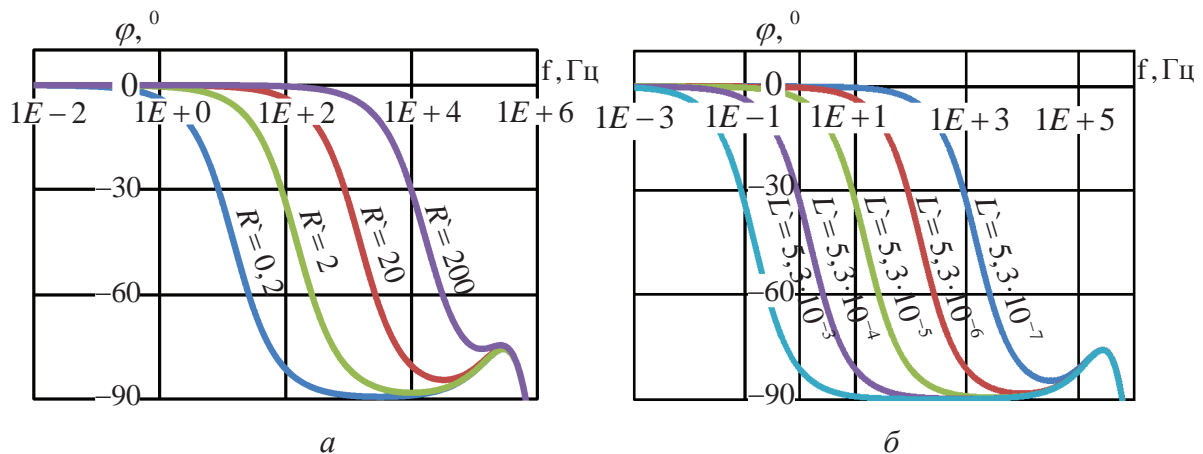


Рис. 5. ФЧХ реактора: а) при неизменном значении  $L=3,123$  мГн; б) при неизменном значении  $R=11,8$  Ом

Характеристики модели реактора получены для условий: входным сигналом является напряжение  $U_{1A}$  на одном конце реактора, выходным сигналом – ток реактора  $i_{SA}$  (рис. 3). На рис. 4, 5, а приведены результаты моделирования при фиксированном значении индуктивности  $3,123$  мГн и различных значениях сопротивления, а на рис. 4, 5, б – при фиксированном значении сопротивления  $11,8$  Ом и различных значениях индуктивности.

Формы полученных характеристик, совпадают с теоретически ожидаемыми для реактора в диапазоне частот от 0 до 10 кГц. В характерных точках значения коэффициентов усиления на нулевой частоте и частот среза совпадают с аналитически рассчитанными для силового реактора по передаточной функции, с учетом масштабных коэффициентов по току  $k_i=509,12$  А/В и по напряжению  $k_U=3000$  В/В.

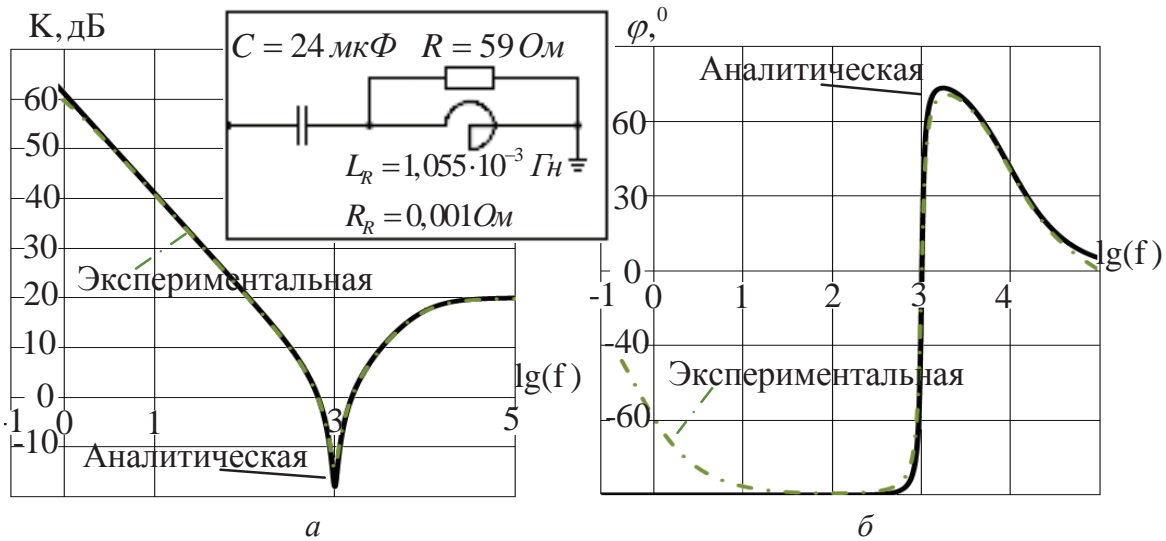


Рис. 6. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) фильтра

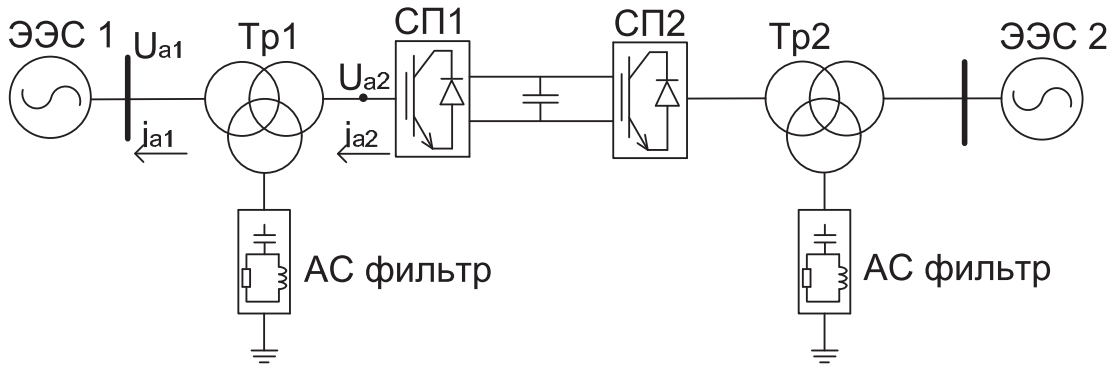


Рис. 7. Разработанная в ВМК РВ ЭЭС схема ВППТ: СП1 и СП2 – статические преобразователи, Тр1 и Тр2 – преобразовательные трансформаторы, ФКУ1 и ФКУ2 – фильтро-компенсирующие устройства

Частотные характеристики фильтра (рис. 6) получены при входном сигнале – ток фильтра  $i_{FA}$ , выходном сигнале – напряжение  $U_{1A}$  (рис. 3) и при структуре и параметрах модели, соответствующих приведенным на рис. 6. Формы полученных характеристик, совпадают с аналитическими в диапазоне до 10 кГц с учетом ранее указанных масштабных коэффициентов по току и напряжению. Небольшие расхождения на рис. 6, б обусловлены свойствами интегральной микросэлектронной элементной базы.

Для исследования экспериментального образца СГП ВППТ на базе ВМК РВ ЭЭС была реализована схема двухмашинной сети (рис. 7) и протестирована работа модели ВППТ на базе двухуровневого ПН.

На рис. 8 представлены RQ характеристика двухуровневого ПН (частота коммутации 1050 Гц) и осциллограммы напряжений и токов, полученные в результате испытаний СГП ВППТ. Диаграмма мощности (рис. 8, а) иллюстрирует работу преобразовательного блока в четырех квадрантах для нормальных режимов и режимов перегрузки. Ре-

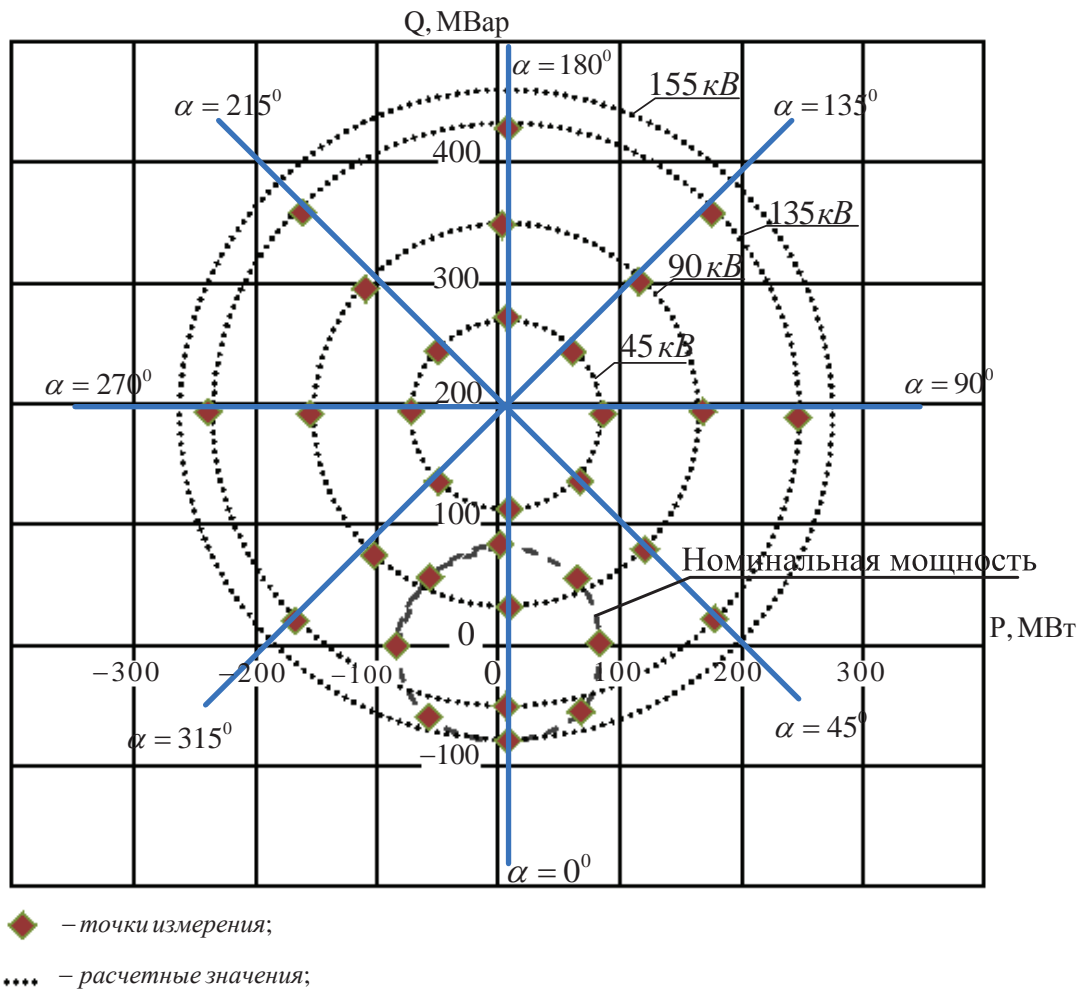
жимы генерации, потребления активной и реактивной мощности получены при различных напряжениях, формируемых на трехфазной стороне ПН. Центр окружности смещен по активной мощности, что определяется потерями в преобразовательном блоке [19].

Измеренные значения составляющих мощности соответствуют значениям для данных уровней напряжений, рассчитанным по выражению [20]:

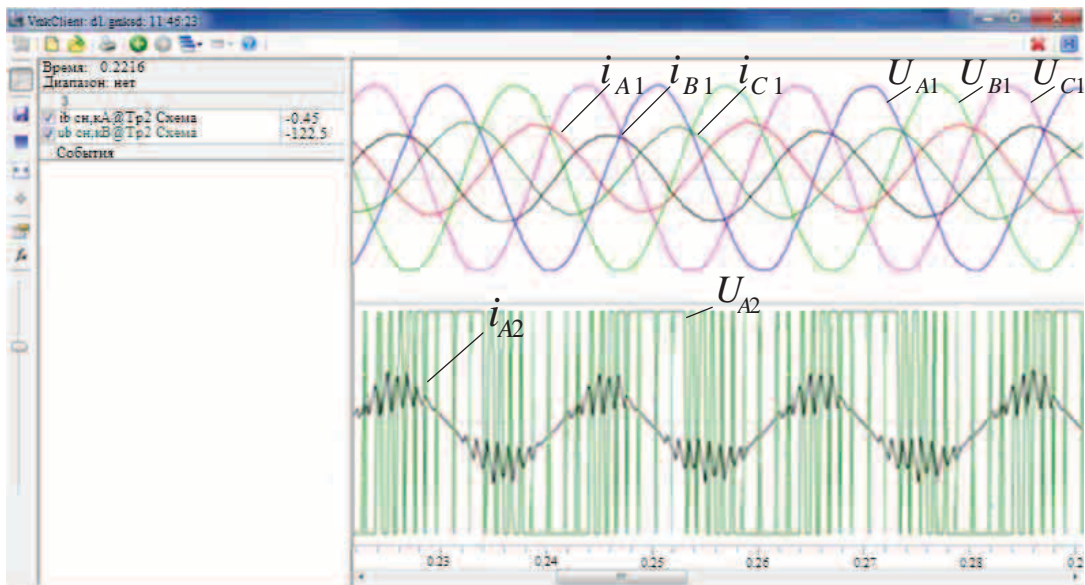
$$S = 3 \frac{U_c U_{сп}}{X} \sin(\alpha) - j3 \left( \frac{U_c U_{сп}}{X} \cos(\alpha) - \frac{U_c^2}{X} \right) = P - jQ,$$

где  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная составляющие мощности,  $\alpha$  – угол между векторами напряжения сети  $U_c$  и статического преобразователя  $U_{сп}$ ,  $X$  – сопротивление между точками с напряжениями  $U_c$  и  $U_{сп}$ .

Полученные результаты исследования экспериментального образца СГП ВППТ подтверждают его работоспособность. Благодаря возможности объединения любого количества СГП на физическом уровне и их централизованного управления



a



б

Рис. 8. PQ характеристика (а) и осциллограммы мгновенных значений фазных токов и напряжений ПН (б), где  $i_{A1}$ ,  $U_{A1}$ ,  $i_{A2}$ ,  $U_{A2}$  – токи и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора (рис. 7)

на уровне сервера дальнейшая задача разработки и тестирования многоуровневых преобразователей и многотерминальных ВППТ будет заключаться лишь в реализации соответствующих цифровых моделей СУРЗА.

### Выводы

Разработанная гибридная модель ВППТ обладает функциональными возможностями, необходимыми для исследования взаимного влияния ВППТ и больших систем переменного тока на базе ВМК РВ ЭЭС. Благодаря обеспечению реального времени моделирования и возможности взаимодействия модели с внешними устройствами и системами на физическом и информационном уров-

нях она может использоваться не только для задач анализа работы энергосистем, но и для разработки, настройки и тестирования СУРЗА ВППТ, а также новых типов защит и систем управления ЭЭС переменного тока, в том числе распределенных. Дальнейшее развитие работы предусматривает реализацию модели СУРЗА и проверку экспериментальных исследований модели ВППТ в составе сложной ЭЭС, а также анализ работы модели при подключении к ней микропроцессорных устройств СУРЗА.

*Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. Соглашение № 14.В37.21.1506, от 20 сентября 2012 года.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2008 г. № 215-р «О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 11. – 260 с.
2. Mitra P., Vinothkumar K., Lidong Z. Dynamic Performance Study of a HVDC Grid Using Real-Time Digital Simulator // IEEE Workshop on Complexity in Engineering. – 2012. – P. 1–6.
3. Baran M., Mahajan N. Overcurrent protection on voltage sourced converter based multiterminal DC distribution systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – V. 22. – № 1. – P. 406–412.
4. Anderson P.M. Power System Protection. – New York: IEEE Press, 1999. – 1331 p.
5. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault / A. Li, Z. Cai, Q. Sun, X. Li, D. Ren, Z. Yang // Power & Energy Society General Meeting. – Calgary, Canada, 26–30 July 2009. – P. 1–5.
6. Candelaria J., Park J.D. VSC-HVDC system protection: A review of current methods // Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE). – Phoenix, Arizona, 20–23 March 2011. – P. 1–7.
7. Jovic D. Interconnecting offshore wind farms using multiterminal VSC-based HVDC // Power Engineering Society General Meeting, IEEE. – Montreal, Que., 18–22 June 2006. – P. 1–7.
8. Franck C.M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs // IEEE Trans. Power Del. – 2011. – V. 26. – № 2. – P. 998–1007.
9. Tang L., Ooi B.-T. Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems // IEEE Trans. Power Del. – 2007. – V. 22. – № 3. – P. 1877–1884.
10. Ahmed W., Manohar P. DC Line Protection for VSC-HVDC System // Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. – Bangalore, Indian, 16–19 December 2012. – P. 1–6.
11. Problems and Solutions for AC Transmission Line Protection under Extreme Conditions caused by Very Long HVDC Cables / S. Hoist, I. Brncic, D. Shearer, R. Mangelred, K. Korjeman // Study Committee B5 Colloquium. – 2007. – P. 1–8.
12. Wide-Area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations / Y. Li, Ch. Rehtanz, S. Rüberg, L. Luo, Y. Cao // IEEE Transactions On Power Delivery. – 2012. – V. 27. – № 3. – P. 1096–1105.
13. Dacai Qi. Defense schema against large disturbances in China Southern Power Grid // Electra. – 2011. – № 257. – P. 4–16.
14. Li W., Xiao X. Electromagnetic and Electromechanical Transient Hybrid Real-time Simulation Technology Based on RTDS Used in Subsynchronous Resonance Research // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China, 24–28 October 2010. – P. 1–6.
15. Yun L., Yonghu Y., Nanchao Z. Establishment of the HVDC digital-analogical hybrid simulation system // International conference on Electrical Engineering (ICEE). – YongPyong Resort, Korea, 9–13 July 2006. – P. 1–8.
16. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep < 3  $\mu$ s / P.A. Forsyth, T.L. Maguire, D. Shearer, D. Rydmell // International Conference on Power Systems Transients. – Kyoto, Japan, 2–6 June 2009. – P. 1–5.
17. RTDS® Simulation of small signal stability controller of STATCOM / D. Sreenivasarao, S.P. Gupta, G.N. Pillai, P.V. Balasubramanyam // XXXII National Systems conference. – Roorkee, India, 17–19 December 2008. – P. 241–244.
18. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем / А.С. Гусев, Ю.В. Хрущев, С.В. Гурин, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Электричество. – 2009. – № 12. – P. 5–8.
19. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage / Zh. Yang, Ch. Shen, L. Zhang, M.L. Crow // Power Engineering Society Summer Meeting. – Seattle, USA, 16–20 July 2000. – P. 669–674.
20. Static synchronous compensators (STATCOM): a review / B. Singh, R. Saha, A. Chandra, K. Al-Haddad // IET Power Electronics. – 2009. – № 4. – V. 2. – P. 297–324.

Поступила 23.09.2013 г.



UDC 621.311.001.57

## DEVELOPMENT OF HYBRID MODELS OF HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS FOR COMPREHENSIVE ANALYSIS OF LARGE POWER SYSTEMS

**Anton V. Prokhorov,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: antonprokhorov@tpu.ru

**Aleksey S. Vasilev,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: vasilevas@tpu.ru

**Nikolay Yu. Ruban,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: rubanny@tpu.ru

**Ruslan A. Ufa,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: hecn@tpu.ru

*The relevance of the research is based on the need to develop new methods and tools for obtaining information required to evaluate mutual influence between high voltage direct and alternating current systems.*

**The research object:** the development of hybrid model of high-voltage direct current system based on voltage-source converter allowing real time co-simulation of its power equipment, control and relay protection systems.

**The research methods:** analytical methods; theory of discretization methods; control theory; theory of accuracy and sensitivity of computing devices; hybrid simulation approach; software and hardware simulation tools – Multisim 11, Matlab Simulink and Hybrid Real Time Power System Simulator.

**The results:** The authors have developed the hybrid model of high voltage direct current system based on voltage source converter in accordance with the formulated requirements for the mathematical models of high voltage direct current systems and computational tools; the obtained results of the model testing confirm the achievement of the required properties of the model and the effectiveness of the proposed solutions.

### Key words:

High voltage direct current systems, simulation, protective relaying and automation, real time systems, power electronics.

### REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22 fevralya 2008 g. № 215-r. o Generalnoy skheme razmeshcheniya obektov elektroenergetiki do 2020 goda [The order of the Government of the Russian Federation dated February 22, 2008, no. 215-p. Master Plan for electricity facilities allocation up to 2030]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Laws of the Russian Federation], 2008, no. 11.
2. Mitra P., Vinothkumar K., Lidong Z. Dynamic Performance Study of a HVDC Grid Using Real-Time Digital Simulator. *IEEE Workshop on Complexity in Engineering*, 2012. pp. 1–6.
3. Baran M., Mahajan N. Overcurrent protection on voltage sourced converter based multiterminal DC distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 406–412.
4. Anderson P.M. *Power System Protection*. New York, IEEE Press, 1999. 1331 p.
5. Li A., Cai Z., Sun Q., Li X., Ren D., Yang Z. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault. *Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, Canada, 26–30 July 2009. pp. 1–5.
6. Candelaria J., Park J.D. VSC-HVDC system protection: A review of current methods. *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*. Phoenix, Arizona, 20–23 March 2011. pp. 1–7.
7. Jovcic D. Interconnecting offshore wind farms using multiterminal VSC-based HVDC. *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*. Montreal, Que., 18–22 June 2006. pp. 1–7.
8. Franck C.M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs. *IEEE Trans. Power Del.*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 998–1007.
9. Tang L., Ooi B.-T. Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems. *IEEE Trans. Power Del.*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 1877–1884.
10. Ahmed W., Manohar P. DC Line Protection for VSC-HVDC System. *Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. Bangalore, Indian, 16–19 December 2012. pp. 1–6.
11. Hoist S., Brncic I., Shearer D., Mangelred R., Korjeman K. Problems and Solutions for AC Transmission Line Protection under Extreme Conditions caused by Very Long HVDC Cables. *Study Committee B5 Colloquium*, 2007. pp. 1–8.
12. Li Y., Rehtanz Ch., Rüberg S., Luo L., Cao Y. Wide-Area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 1096–1105.
13. Dacai Qi. Defense schema against large disturbances in china southern power grid. *Electra*, 2011, no. 257, pp. 4–16.
14. Li W., Xiao X. Electromagnetic and Electromechanical Transient Hybrid Real-time Simulation Technology Based on RTDS Used in Subsynchronous Resonance Research. *International Conference*

- on *Power System Technology (POWERCON)*. Hangzhou, China, 24–28 October 2010. pp. 1–6.
15. Yun L., Yonghu Y., Nanchao Z. Establishment of the HVDC digital-analogical hybrid simulation system. *International conference on Electrical Engineering (ICEE)*. YongPyong Resort, Korea, 9–13 July 2006. pp. 1–8.
  16. Forsyth P.A., Maguire T.L., Shearer D., Rydmell D. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep  $< 3 \mu\text{s}$ . *International Conference on Power Systems Transients*. Kyoto, Japan, 2–6 June 2009. pp. 1–5.
  17. Sreenivasarao D., Gupta S.P., Pillai G.N., Balasubramanyam P.V. RTDS® Simulation of small signal stability controller of STATCOM. *XXXII National Systems conference*. Roorkee, India, 17–19 December 2008. pp. 241–244.
  18. Gusev A.S., Hrushchev Yu.V., Gurin S.V., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. Vserezhimny modeliruyushchiy kompleks realnogo vremeni elektroenergeticheskikh sistem [Hybrid Real Time Simulation of Electrical Power Systems]. *Electrical Technology Russia*, 2009, no. 12, pp. 5–8.
  19. Yang Zh., Shen Ch., Zhang L., Crow M.L. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage. *Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 16–20 July 2000. pp. 669–674.
  20. Singh B., Saha R., Chandra A., Al-Haddad K. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 297–324.

УДК 621.313

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**Встовский Алексей Львович,**

канд. техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: val\_1942@mail.ru

**Федий Константин Сергеевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: fediy\_k@mail.ru

**Архипцев Максим Геннадьевич,**

аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: maximus\_09@mail.ru

**Спирин Евгений Анатольевич,**

ассистент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств механико-технологического факультета Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

*Показаны возможности использования асинхронной машины в качестве генератора автономной энергоустановки для энергоснабжения для северных регионов России. Представлены основные достоинства применения асинхронных машин в генераторном режиме для обеспечения питанием потребителей, как переменного трехфазного тока, так и постоянного тока через выпрямительные устройства. Представлена разработанная система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Такая система простая в эксплуатации, сравнительно недорогая, обладает высоким быстродействием и позволяет регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки. С помощью эксперимента проведен анализ системы автоматического управления асинхронным генератором. Показана целесообразность использования автоматического регулятора напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа.*

**Ключевые слова:**

*Асинхронный генератор, автономный генератора, система управления, микроГЭС, конденсаторные батареи.*

Использование альтернативных источников энергоснабжения для северных регионов России особенно актуально, вследствие их географического положения. Отдаленность этих территорий от линий электропередач определяет огромные материальные затраты по доставке энергоносителей. Основной возможностью использования альтернативных источников энергоснабжения для этих районов является наличие природных факторов [1], на основе которых возможно создание возобновляемых источников электроснабжения – это гидро-ресурсы рек и возможность использования энергии ветра в этих регионах.

В последние годы значительный интерес вызывает применение асинхронных машин в генераторном режиме для обеспечения питанием потребителей, как переменного трехфазного тока, так и постоянного тока через выпрямительные устройства. Эти машины сравнительно просты по конструкции, весьма надежны в эксплуатации, имеют достаточно высокие энергетические показатели и невысокую стоимость. Асинхронные генераторы (АГ) легко включаются на параллельную работу, а форма кривой выходного напряжения у них ближе к синусоидальной, чем у синхронного генератора (СГ) при работе на одну и ту же нагрузку [2]. Учитывая перечисленные достоинства АГ, его применение в автономных источниках электроснабжения имеет большое будущее, в частности, в микроГЭС при устойчивом режиме нагрузки [3].

Целью работ, проводимых специалистами Сибирского федерального университета, стало создание дешевой и доступной микроГЭС мощностью 2 кВт, выходным напряжением 220 В, частотой 50 Гц, основными частями которой являются: асинхронный генератор, оригинальная ортогональная турбина и система управления, разработанная специально для данной энергоустановки.

Ортогональная турбина в зависимости от характеристик используемого профиля крыла и параметров водного потока может иметь быстроходность в диапазоне  $U=3,5...5$ . При скоростях потока от 2,5 до 3,5 м/с появляется возможность применять недорогие напорные ортогональные турбины, имеющие сравнительно малые массогабаритные характеристики, диаметрами от 150 до 500 мм, обладающие мощностью от 1 до 10 кВт. Номинальная частота вращения таких турбин будет лежать в диапазоне от 500 до 2000 об/мин.

В качестве АГ для микроГЭС были рассмотрены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии АИР. Учитывая, что скорость вращения турбины ограничивается скоростями течений рек, а режимы работы машины предполагают большие значения токов в обмотке статора, был выбран «низкоскоростной» асинхронный двигатель серии АИР112МВ8, номинальные данные которого приведены в таблице.

Рассматриваемая энергетическая установка предполагает в первую очередь достаточно стабильный поток малых рек, а соизмеримость мощ-

ностей нагрузки и гидравлического привода генератора определяют задачи стабилизации в нужных пределах частоты и напряжения переменного тока автономной энергоустановки.

**Таблица.** Технические характеристики электродвигателей серии АИР

Двигатель	Мощность, кВт	об/мин	Ток при 380 В, А	КПД, %	Коэф. мощности	Масса, кг
АИР112МВ8	3	710	7,8	79	0,74	48

К основным показателям качества источников электропитания относятся параметры выходного напряжения, характеризующиеся номинальными величиной и частотой. Поэтому важнейшим элементом энергоустановки является система стабилизации, обеспечивающая статически устойчивый режим работы гидроагрегата и стабилизацию его выходного напряжения.

Эксперименты с выбранным генератором показали, что самовозбуждение АГ наступает при нижней критической частоте вращения ротора (350 об/мин) и постоянно подключенной емкости (30 мкФ). Если сначала приводится во вращение ротор асинхронной машины (АМ), а затем в цепь статора включается емкость, то при частоте вращения, превышающей нижнюю критическую скорость, возможны перенапряжения, которые могут вывести из строя полупроводниковые элементы. Если скорость вращения ротора будет меньше нижней критической скорости, то самовозбуждения не произойдет. Для перевода машины в генераторный режим необходимо увеличить частоту вращения ротора от 350 об/мин и выше. Однако при этом асинхронная машина может попасть в режим жесткого самовозбуждения, в конце которого возможны перенапряжения еще большей кратности. При обратном порядке включения, когда сначала к статорным обмоткам подключают конденсаторы, а затем ротор приводят во вращение, процесс самовозбуждения протекает медленнее, чем в предыдущем случае, но при плавном нарастании амплитуды колебаний напряжения. Поэтому при разработке автоматической системы управления генератором следует исходить из условия постоянного подключения конденсаторов возбуждения к статорным обмоткам асинхронного генератора. Для определения основной величины емкости конденсаторов, которые будут постоянно включены в цепь статора, были проведены исследования зависимости частоты вращения и напряжения возбуждения, от величины емкости конденсаторов при различных вариантах включения асинхронного генератора, как на холостом ходу, так и под нагрузкой. При проведении экспериментальных исследований были обеспечены условия мягкого самовозбуждения асинхронного генератора.

Принципы стабилизации режима АГ, на основе которых выполнена система управления, предста-

влют собой двухканальную систему автоматического регулирования с адаптивными свойствами, которая позволяет решать задачу наиболее полного отбора мощности энергоустановки при существенном изменении условий её работы в зависимости от скорости водного потока. Однако при малых скоростях потока система выходит из режима стабилизации частоты и уровня выходного напряжения генератора, при этом допустимыми минимальными пределами являются уровень 45 Гц по частоте и 80 % номинального напряжения генератора. Такие уровни питания могут удовлетворить лишь неответственных потребителей электроэнергии микроГЭС.

Проведенный анализ системы управления выявил, что для АГ целесообразно использовать автоматический регулятор напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа. Такая система простая в эксплуатации, сравнительно недорогая, обладает высоким быстродействием и позволяет регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки.

Структурная схема системы управления (рис. 1) состоит из силовых ключей на базе оптронных тиристоров Т1–Т3 с фазовым управлением, включающих ступени емкостных батарей С1–С3. Такие ключи не искажают форму тока и напряжения при максимальной мощности, рассеиваемой на балластных сопротивлениях. При этом происходит плавное изменение углов управления тиристоров во всем диапазоне регулирования. Три датчика напряжения (ДН) необходимы для снятия с фаз генератора значений напряжения и частоты. Значения фазных напряжений с датчиков поступают на измерительный блок, который анализирует их величину и передает на источник бесперебойного питания (ИБП), входящий в блок управления (БУ). Он необходим для сглаживания помех в кривой тока. Измерительный блок представляет собой трансформатор напряжения, все обмотки которого (первичные и вторичные) соединены звездой. К вторичным обмоткам трансформатора подключен трехфазный мостовой выпрямитель, напряжение с которого подается на вход измерительного контроллера.

Блок управления состоит из аналого-цифрового преобразователя, формирующего выходной сигнал фазного тока генератора в четырехразрядном двоичном коде, измерительных приборов электрических величин и компаратора. Компаратор сравнивает двоичный код с кодом, соответствующим 50 Гц, и вырабатывает сигналы управления «>» – больше, «<» – меньше, «=» – равно, и подает их на управляющие электроды тиристоров Т1–Т3, подключающие необходимые емкостные батареи.

Режим работы ключей Т1–Т3 формируется реверсивным счётчиком. При увеличении нагрузки частота напряжения генератора уменьшается, код увеличивается и подключается дополнительная емкость, что восстанавливает частоту и величину напряжения, при уменьшении нагрузки код умень-

шается, повышается частота напряжения генератора и отключается часть емкости. Для управления реверсивным счётчиком используются сигналы схемы сравнения. Сигнал «=» (частота 50 Гц) запрещает счёт. Сигнал «>» (частота >50 Гц) переключает счётчик на сложение и изменяет подключаемые емкости С1–С3.

Импульсы счёта на реверсивный счётчик подаются через схему защиты, которая не позволяет счётчику после заполнения обнулиться, а после опустошения перейти в заполненное состояние.

Вся информационная часть системы управления модулем стабилизации частоты защищена от высокого напряжения ключей Т1–Т3 гальваническими развязками (оптопары). С этой же целью в схеме управления используются гальванически развязанные источники питания основной части схемы и буферных каскадов силовых транзисторов IGBT.

Система управления генератором микроГЭС реализована на современных комплектующих изделиях с высокими технико-эксплуатационными параметрами. В частности, в качестве измерителей фазных напряжений использованы интегральные датчики напряжений LV-25Р, действие которых основано на эффекте Холла. Эти датчики обеспечивают простые и точные решения измерения напряжений при высоком уровне гальванической развязки цепей, линейности преобразования и отсутствие «мертвой зоны» при малых контролируемых токах.

Наиболее сложной проблемой при проектировании системы управления АГ для микроГЭС стала проблема стабилизации напряжения и частоты автономно работающего АГ, имеющего «мягкую» внешнюю характеристику. При использовании асинхронного режима генератора в составе автономной электроустановки (ЭУ) эта проблема осложняется еще и нестабильностью частоты вращения ротора.

Другим недостатком АГ является потребление значительной реактивной мощности (50 % и более от полной мощности), необходимой для создания магнитного поля в машине, которая должна поступать из сети при параллельной работе асинхронной машины в генераторном режиме с сетью или от другого источника реактивной мощности (батарея конденсаторов (БК) при автономной работе АГ. В последнем случае наиболее эффективно включение батареи конденсаторов в цепь статора параллельно нагрузке.

Для этого при решении поставленной задачи параллельно статорной обмотке подключены четыре группы конденсаторов (С1–С4), соединенные в треугольник. Каждая группа конденсаторов подключается в зависимости от потребляемой мощности, так как индуктивная нагрузка, понижающая коэффициент мощности, вызывает резкое увеличение значения емкостного сопротивления. В рассматриваемой энергоустановке были установлены четыре батареи конденсаторов 30, 20, 10 и 4 мкФ,



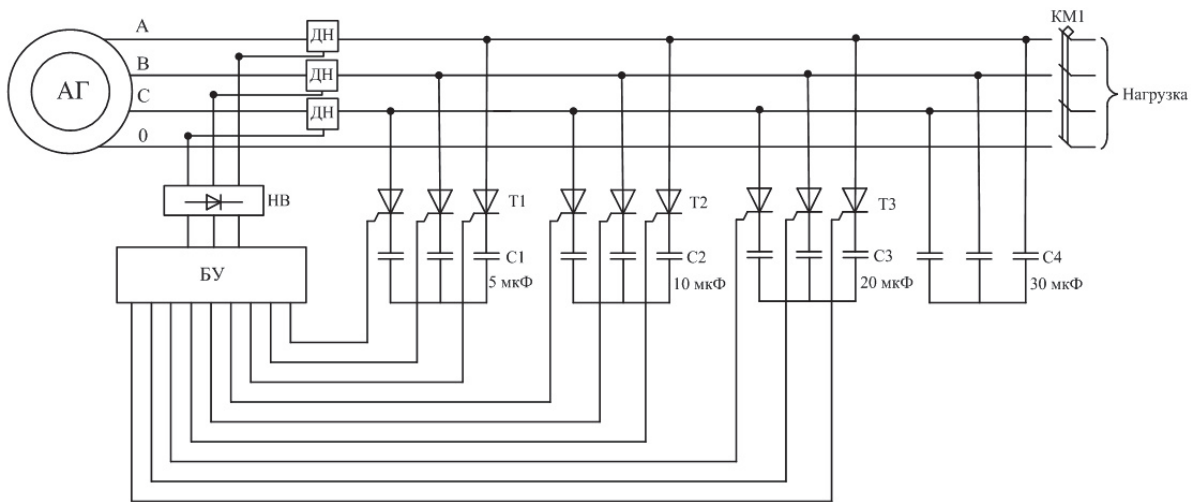


Рис. 1. Структурная схема системы управления

при этом батарея на 30 мкФ подключена постоянно для возбуждения АГ на малых частотах вращения. Конденсаторы установлены с возможностью быстрой замены, в случае выхода из строя.

Для предварительных испытаний генератора в различных рабочих и аварийных режимах был смонтирован экспериментальный стенд (рис. 2). На экспериментальном стенде исследуются основные характеристики и параметры генератора, отработка основных узлов системы управления, выявление каких-либо конструктивных недостатков при сборке с целью их устранения до установки на микроГЭС.

Экспериментальный стенд состоит из ЧП – частотного преобразователя (Altivar) для управления приводным асинхронным двигателем (Д) мощностью 5 кВт. Задача этого двигателя – формировать внешнюю характеристику турбины. Через ременную передачу приводной двигатель соединен с АГ. С АГ на блок управления (БУ) подаются ток и частота, которые регулируются в заданных пределах в зависимости от подключенной нагрузки (Н). В качестве нагрузки использовались лампы накаливания общей мощностью 2,1 кВт. На входе и выходе системы управления были подключены ИП – измерительные приборы (амперметр, вольтметр и частотомер) для снятия показаний тока, напряжения и частоты.

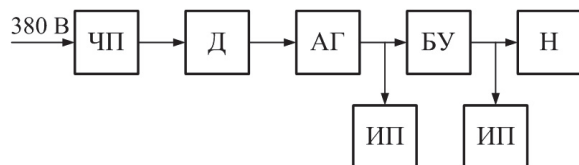


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда

Главная задача стендовых испытаний заключалась в проверке правильности выбора количества емкостных батарей и их значений, а также в ана-

лизе значений тока при сбросе и набросе нагрузки.

В результате эксперимента были получены данные изменения тока, напряжения, частоты напряжения и емкости подключаемых конденсаторов в зависимости от увеличения нагрузки  $I, U, f, C = f(P)$  (рис. 3).

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что частота и амплитуда напряжения, вырабатываемого АГ при постоянных емкости конденсаторов возбуждения и частоты вращения ротора, зависят от величины и характера нагрузки. При активной нагрузке величина напряжения и его частота являются функциями скольжения. Подключение индуктивной нагрузки к АГ приводит к уменьшению емкостного тока и, как следствие, к снижению тока намагничивания, ЭДС и напряжения. Поэтому для стабилизации амплитуды и частоты напряжения, вырабатываемого микроГЭС, при колебаниях смешанной нагрузки и энергии рабочего потока воды необходимо регулировать и мощность балластной нагрузки, и величину тока конденсаторов возбуждения.

При испытаниях балластная нагрузка подключалась и отключалась в диапазоне изменения выходного напряжения генератора от 180 до 250 В и изменении частоты от 45 до 55 Гц, обеспечивая при этом высокое быстродействие.

Анализ рис. 3, на котором показаны кривые тока, напряжения, частоты и величины подключаемых емкостей в зависимости от нагрузки, свидетельствует о том, что при нагрузке до 300 Вт ток и напряжение генератора практически не меняются. При нагрузке, равной 450 Вт, происходит подключение емкостных батарей, в результате чего происходит резкий скачек тока и незначительное увеличение напряжения, частота при этом снижается. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит подключение дополнительных емкостных батарей, из-за которых ток, напряжение и частота снижаются скачкообразно.

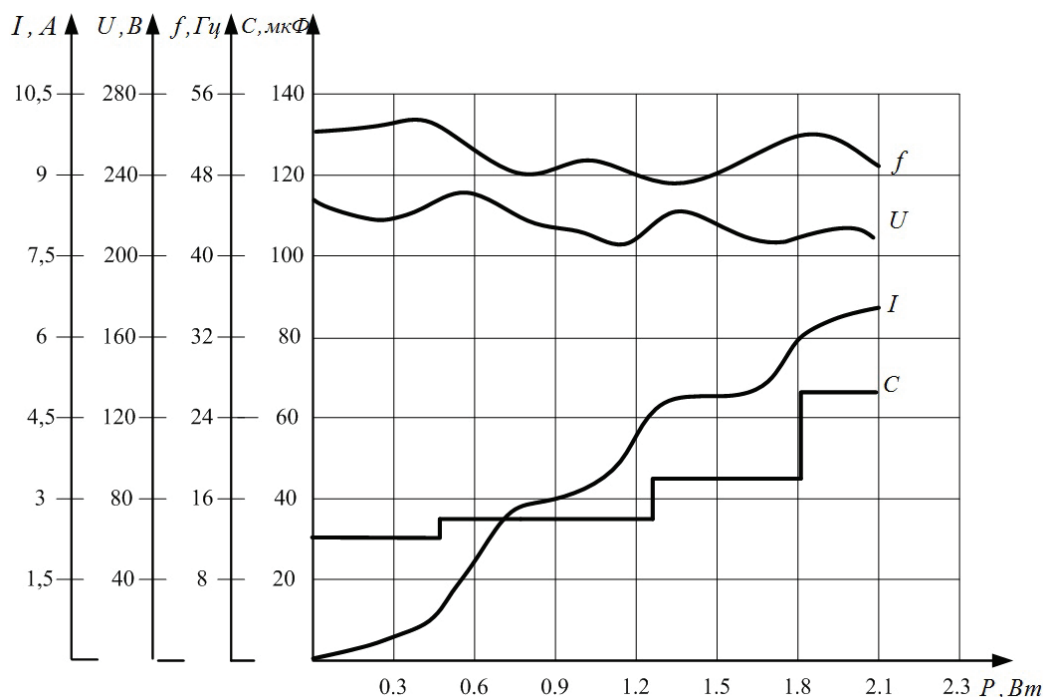


Рис. 3. Графики изменения тока ( $I$ ), напряжения ( $U$ ), частоты ( $f$ ) и емкости ( $C$ ) подключаемых конденсаторов в зависимости от увеличения нагрузки

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что использование емкостных батарей для системы управления является достаточно простым и надежным способом стабилизации и получения требуемых величин выходного напряжения и частоты. Для получения постоянного значения выходного напряжения и частоты при изменении нагрузки, подключаются емкостные батареи.

#### Выводы

Исследованная система управления асинхронного генератора стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии, основанная на подключении емкостных батарей с помощью тиристорных

преобразователей с фазовым регулированием, удовлетворяет требованиям потребителей.

При минимальном количестве емкостей системы управления микроГЭС регулирование выходного напряжения генератора возможно в пределах от 180 до 250 В и изменении частоты от 45 до 55 Гц. При большем количестве ступеней регулирования качество стабилизации напряжения и частоты повышается.

Разработанная система управления универсальна и может применяться как для объектов малой гидроэнергетики (низконапорные и свободнопоточные микроГЭС), так и для объектов ветроэнергетики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 88 с.

3. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектростанции. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т; Севастополь: Севастопольский нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

Поступила 16.03.2013 г.

UDC 621.313

## ASYNCHRONOUS GENERATOR CONTROL SYSTEM FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

**Alexei L. Vstovskiy,**

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,  
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: val\_1942@mail.ru

**Konstantin S. Fediy,**

Cand. Sc., Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,  
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: fediy\_k@mail.ru

**Maxim G. Arkhiptsev,**

Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,  
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: maximus\_09@mail.ru

**Evgeny A. Spirin,**

Siberian Federal University, Russia, 660074, Krasnoyarsk,  
Kirenskogo street, 26, G2-33. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

*The paper demonstrates the possibility of using the asynchronous machine as a generator to supply power to battery power plant for the northern regions of Russia. The work introduces the main advantages of applying induction machines in generating mode to provide power to consumers both three-phase alternating current and direct current through the rectifier devices. The developed control system for asynchronous generator of renewable energy source is introduced. Such system is simple in application, relatively inexpensive, has high speed and allows adjusting parameters of voltage over a wide load range. The asynchronous generator automatic control system was experimentally analyzed. The authors demonstrate the availability of using an automatic voltage regulator with linear capacitors as such system.*

### **Key words:**

*Asynchronous generator, autonomous generator, control system, micro-HPS, capacitor banks.*

### **REFERENCES**

1. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy* [Individual electricity from micro-hydropower stations]. Tomsk, STT, 2001. 120 p.
2. Toroptsev N.D. *Asinkhronnye generatory dlya avtonomnykh elektroenergeticheskikh ustanovok* [Asynchronous generators for au-
3. tonomous power installations]. Moscow, NTF Energoprogress Publ., 2004. 88 p.
3. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. *Neischerpaemaya energiya. Vetroelektrogeneratory* [Inexhaustible energy. Wind power generators]. Kharkov, Sevastopol National Technical University Publ., 2003. B. 1, 400 p.

УДК 621.314

## ДВУХКООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА СОЛНЦЕ

Аржанов Кирилл Владимирович,

аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлек-  
троники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40. E-mail: rbhx@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых высокоэффективных систем наведения солнечных батарей на Солнце.

**Цель работы:** создание двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце для фотоэлектрической электростанции, обеспечивающей заданную точность наведения и минимизацию энергетических затрат при наведении, с использованием в системе наведения вентильных двигателей.

**Методы исследования** основаны на общих положениях теории автоматического управления, теории электропривода, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем.

**Результаты:** в фотоэлектрической электростанции предложено использовать в системе наведения солнечной батареи на Солнце двухкоординатный электропривод, содержащий два вентильных двигателя серии ДБМ, микропроцессорную систему управления транзисторными преобразователями, адаптивный контур управления, построенный по принципу системы с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой с введением двух производных по заданию на вход регулятора тока электропривода. Для фотоэлектрической электростанции разработаны контроллер наведения на Солнце и блок датчиков положения Солнца, обеспечивающие наведение механической рамы с солнечной батареей на Солнце с точностью 1 градус. При перемещении по положению в электроприводе организован несимметричный режим позиционирования с ограничением скорости вращения, ускорения, торможения и рывка вентильного двигателя.

### Ключевые слова:

Контроллер наведения на Солнце, вентильный двигатель, самонастраивающаяся система управления, режим позиционирования, датчик положения Солнца, автоматическое слежение за Солнцем.

В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) ведется разработка двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце для фотоэлектрической электростанции мощностью до 2 кВт. Целью работы является создание следяще-позиционного электропривода с вентильным двигателем, который обеспечивает заданную точность наведения солнечных батарей и минимизацию энергетических затрат при наведении. Предложено в системе наведения использовать вентильные двигатели серии ДБМ [1, 2]. Применение двигателей серии ДБМ обусловлено тем, что они могут эксплуатироваться в температурном диапазоне от  $-60$  до  $+85$  градусов, повышенного уровня влажности, вибраций и ударов, воздействия соляного тумана, плесневых грибов, дождя и имеют срок службы 50 тысяч часов в течение 20 лет.



Рис. 1. Эскиз фотоэлектрической электростанции

На рис. 1 приведен эскиз разрабатываемой фотоэлектрической электростанции. Конструкция состоит из следующих элементов: рама с восемью фотоэлектрическими батареями типа КСМ-200 [3];

подвижный каркас; неподвижный каркас; два редуктора; два вентильных двигателя; блок датчиков положения Солнца; четыре конечных выключателя.

Функциональная схема двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце приведена на рис. 2.

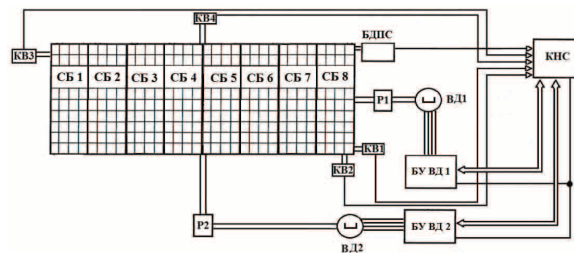


Рис. 2. Функциональная схема двухкоординатной системы наведения

На рис. 2 приняты следующие обозначения: СБ 1–СБ 8 – солнечные батареи; ВД1, ВД2 – вентильные двигатели; Р1, Р2 – редукторы; БУ ВД1, БУ ВД2 – блоки управления вентильными двигателями; БДПС – блок датчиков положения Солнца; КНС – контроллер наведения на Солнце; КВ1–КВ4 – конечные выключатели. В установке используются червячные редукторы и вентильные двигатели типа ДБМ 120-1,6-0,75-2. Блоки управления вентильным двигателем содержат: контроллер управления электроприводом, транзисторный преобразователь, драйвер датчика положения ротора.

На рис. 3 приведена функциональная схема электропривода для системы наведения с двумя



вентильными двигателями ДБМ 120 и двумя датчиками положения ротора ВТ60 [4]. На рис. 3 приняты следующие обозначения: ТП1, ТП2 – транзисторные преобразователи, ВД1, ВД2 – вентильные двигатели, ДПР1, ДПР2 – датчики положения ротора, КНС – контроллер наведения на Солнце, КУ ЭП1 и КУ ЭП2 – контроллеры управления электроприводами, ДТ1 – ДТ4 – датчики тока.

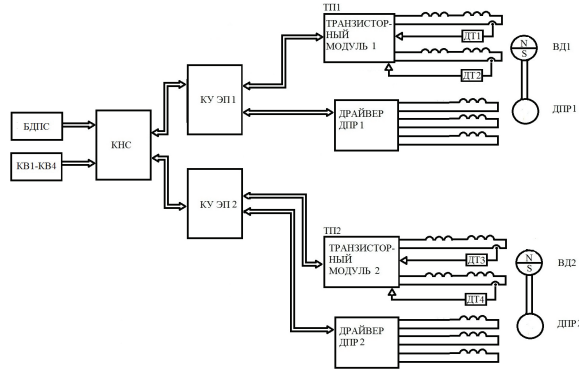


Рис. 3. Функциональная схема системы электропривода

Контроллер управления электроприводами КУ ЭП1 (КУ ЭП2) выполнен на микроконтроллере STM32F103 [5] и обеспечивает следующие режимы: прием и передачу команд с КНС; обработку сигнала с драйвера ДПР1 (ДПР2) и формирование сигналов синуса и косинуса угла поворота вала двигателя и сигнала по скорости вращения двигателя; передачу сигналов управления на транзисторный преобразователь для управления двухфазным вентильным двигателем; регулирование скорости вращения двигателя и адаптивное управление в контуре регулирования скорости вращения двигателя. Связь между контроллерами в системе управления электроприводом осуществляется по протоколу RS485. На рис. 4 показана структурная схема управления электроприводом с вентильными двигателями серии ДБМ 120 на одну координату. На рис. 4 приняты следующие обозначения: РС – регулятор скорости, ЭМ – эталонная модель, ДЗ1, ДЗ2, ДЗ3 – дифференцирующие звенья, НЗ 1, НЗ 2 – нелинейные звенья, МЗ1, МЗ2 – множительные звенья, РЭ1, РЭ2 – релейные элементы, ТП1.1, ТП1.2 – транзисторные преобразователи, ВС – вычислитель синуса угла поворота, ВК – вычислитель косинуса угла поворота, ВОС – вычислитель обратной связи по скорости, ДТ1, ДТ2 – датчики тока, В1, В2 – выпрямители, У1, У2 – первый и второй усилители, РУ1, РУ2 – регулирующие усилители.

Драйвер ДПР1 (ДПР2) формирует сигналы синуса ( $U_1$ ) и косинуса ( $U_2$ ) угла поворота, которые поступают в контроллер управления электропривода (КУ ЭП1 или КУ ЭП2). Вычисление скорости вращения двигателя осуществляется программным путем, с использованием сигналов синуса и косинуса угла поворота [6]. В контроллере управления электроприводом сигналы синуса ( $U_1$ ) и косинуса ( $U_2$ ) угла поворота умножаются на вы-

ходной сигнал регулятора скорости ( $U_{pc}$ ) и получаемые сигналы поступают на входы транзисторного преобразователя ТП1.1 и ТП1.2. Транзисторный преобразователь состоит из двух однофазных инверторов с симметричной ШИМ модуляцией с полевыми транзисторами [7] и драйверами [8] и содержит управляющий микроконтроллер STM32F372VCT6. Микроконтроллер обеспечивает обработку заданного синусоидального и косинусоидального сигналов управления с высокой точностью. Частота коммутации транзисторов до 20 кГц. Токоограничение в транзисторном преобразователе выполнено на уровне шестикратного номинального тока двигателя. Защита по току с выключением транзисторного преобразователя осуществляется на уровне восьмикратного номинального тока двигателя.

Электропривод с вентильным двигателем ДБМ 120, с транзисторным преобразователем и контроллером управления электроприводом замкнут через ДПР. Контур тока с электромеханической частью при определенном допущении можно представить как звено второго порядка с переменными постоянными времени [9, 10]. Электромеханическая постоянная времени фазы двигателя ДБМ120-1,6-0,75-2 составляет 1,0 мс, а электромеханическая постоянная времени составляет 12,5 мс, то есть электромеханическая постоянная времени на порядок меньше, чем электромеханическая постоянная времени. В этом случае целесообразно для оптимизации контура регулирования скорости электропривода регулятор скорости выполнить как ПИ регулятор, компенсирующий электромеханическую постоянную времени. Передаточная функция регулятора скорости в этом случае имеет следующий вид (1):

$$W_{pc}(p) = \frac{(T_M p + 1) K_k}{T_M p}, \quad (1)$$

где  $K_k$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_M$  – электромеханическая постоянная времени двигателя;  $p$  – оператор Лапласа.

Коэффициент передачи  $K_k$  в регуляторе скорости определяется по выражению (2):

$$K_k = \frac{T_M}{K_{дв} T_n K_{дс} K_{пр}}, \quad (2)$$

где  $K_{дв}$  – коэффициент передачи двигателя;  $T_n$  – эквивалентная некомпенсированная постоянная времени;  $K_{дс}$  – коэффициент передачи датчика скорости;  $K_{пр}$  – коэффициент передачи преобразователя.

Эквивалентная некомпенсированная постоянная времени в электроприводе определяется по выражению (3):

$$T_n = T_3 + T_\phi + T_{ш}, \quad (3)$$

где  $T_\phi$  – постоянная времени фильтров в прямом канале;  $T_{ш}$  – постоянная времени, равная периоду ШИМ;  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени фазы вентильного двигателя.

В электроприводе точной компенсации электромеханической постоянной времени двигателя

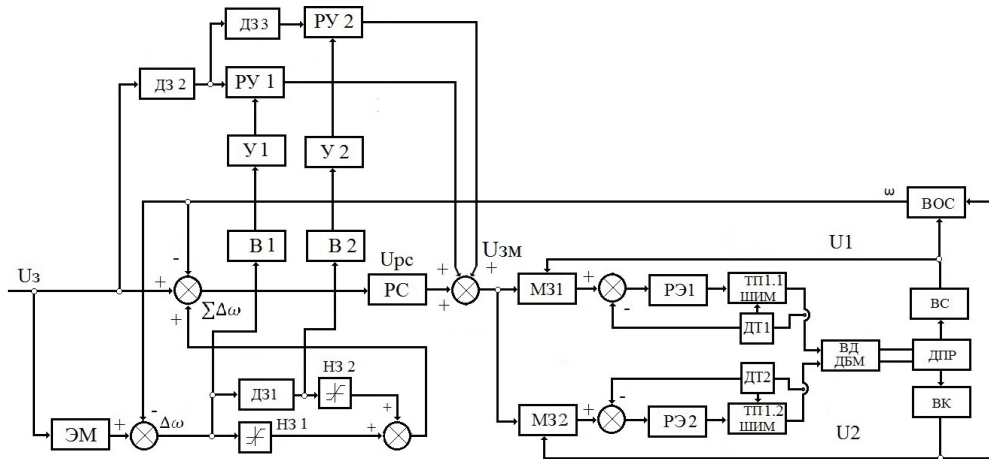


Рис. 4. Структурная схема электропривода

нет, а также в механической системе наведения солнечной электростанции момент инерции самого механизма перемещения меняется за счет пространственного изменения (по азимуту и углу места) положения рам в самой фотоэлектрической электростанции [11]. Для стабилизации динамических характеристик электропривода вводится контур адаптивного управления с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой [12]. Эталонная модель системы электропривода представлена как звено второго порядка. Постоянные времени эталонной модели определяют заданную полосу частот в контуре регулирования скорости вращения и перерегулирование по скорости вращения при пуске двигателя на максимальную скорость не более 10 %. Самонастройка в системе электропривода осуществляется путем введения сигнала ошибки (ошибка между выходным сигналом эталонной модели и сигналом датчика скорости –  $\Delta\omega$ ), её первой производной на вход регулятора скорости электропривода. Вторая производная не вводится, так как она по величине на порядок меньше первой производной. Компенсирующий сигнал определяется по выражению (4):

$$\sum \Delta\omega = \Delta\omega K_1 + T_M \frac{d(\Delta\omega)}{dt} K_2, \quad (4)$$

где  $\sum \Delta\omega$  – компенсирующий сигнал;  $\Delta\omega$  – сигнал ошибки по модели;  $K_1, K_2$  – коэффициенты передачи линейной части звеньев НЗ 1, НЗ 2.

Коэффициенты передачи по ошибке и по её производной оптимизируются исходя из устойчивости системы при больших входных сигналах (в большом), а также по качеству переходных процессов в электроприводе. Далее коэффициенты уточняются при экспериментальных исследованиях на опытном образце электромеханического блока.

Для улучшения динамических характеристик по управляющему воздействию в системе регулирования скорости вводится комбинированное управление, а именно, вводятся две производные по задающему сигналу на вход контура регулирования тока [13, 14]. Передаточная функция допол-

нительного звена по производным представлена в следующем виде (5):

$$W(p) = T_M T_H p^2 + T_M p. \quad (5)$$

В виду того, что электромеханическая постоянная изменяется, необходимо подстраивать коэффициенты у дифференцирующих звеньев (5), которые целесообразно регулировать в функции величины ошибки по модели и её производной [15, 16]. Компенсирующий сигнал по двум производным, поступающий на вход контура регулирования тока, определяется по следующему выражению (6):

$$U_{зм} = \frac{dU_3}{dt} K_3 (\Delta\omega) + \frac{d^2U_3}{dt^2} K_4 \left( \frac{d\Delta\omega}{dt} \right), \quad (6)$$

где  $\frac{dU_3}{dt}$  – первая производная по задающему сигналу;

$\frac{d^2U_3}{dt^2}$  – вторая производная по задающему сигналу;

$K_3$  – коэффициент усиления первого усилителя;  $K_4$  – коэффициент усиления второго усилителя;

$\Delta\omega$  – ошибка сигнала по модели;  $\frac{d\Delta\omega}{dt}$  – производная по ошибке сигнала по модели.

Коэффициенты усиления первого и второго усилителей оптимизируются исходя из качества переходных процессов в электроприводе и недопущения большой перекompенсации по скорости, выражающейся в увеличении перерегулирования и колебательности в переходном процессе. На рис. 5 представлена фотография опытного образца электромеханического блока, содержащего вентильный двигатель ДБМ 120 (позиция 2) с датчиком положения ротора ВТ 60 (внутри корпуса вентильного двигателя), датчиком положения 2БВТ2,5 (позиция 1) и нагрузочного двигателя постоянного тока ДК 1–1,7 (позиция 3). Экспериментальные исследования показали следующее: электропривод обеспечивает полосу пропускания частот 150 Гц, перерегулирование по скорости вращения во всем диапазоне не превышает 10 %.

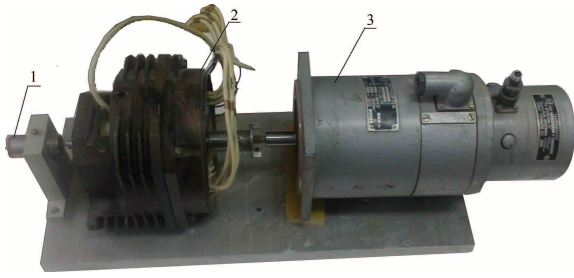


Рис. 5. Фотография электромеханического блока

Для обеспечения наведения солнечных батарей на Солнце разработан контроллер наведения на Солнце, состоящий из: микроконтроллера STM32F372VCT6, пяти операционных усилителей, обеспечивающих усиление сигналов с пяти фотоэлементов блока датчиков положения Солнца, узла связи с четырьмя конечными выключателями. КНС выдает и принимает следующие сигналы: сигналы задания амплитуды скорости перемещения для двух ВД; сигналы направления вращения по двум ВД; сигналы включения (выключения) двух транзисторных преобразователей ВД; сигналы готовности двух транзисторных преобразователей ВД; сигналы с четырех конечных выключателей.

Конструкция разработанного блока датчиков положения Солнца [17] показана на рис. 6.

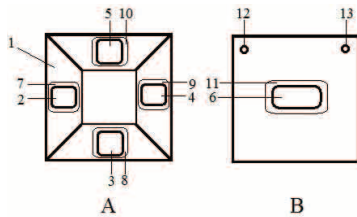


Рис. 6. Конструкция БДПС: А) вид сверху; В) вид снизу

На рис. 6 приняты следующие обозначения: 1 – усеченная пирамида; 2–6 – фотоэлементы; 7–11 – защитные стекла; 12, 13 – элементы крепления. Датчик выполнен в форме усеченной четырехгранной пирамиды с наклоном противоположных граней в 20 градусов. Пирамида изготовлена из дюралюминиевого сплава, в четырех гранях пирамиды и в основании выполнены посадочные места под пять фотоэлементов. Все фотоэлементы зафиксированы в посадочных местах и закрыты защитными стеклами. В основании пирамиды имеются элементы для крепления датчика к поворотной раме солнечной электростанции. Проведены экспериментальные исследования БДПС с целью определения его чувствительности в режиме малых перемещений. Перемещение (вращение) фотодатчика проводилось с помощью поворотного стола от фрезерного станка, имеющего разрешительную способность при перемещении 0,25 углового градуса. Максимальный ток одного фотоэлемента БДПС при максимальной солнечной освещенности достигает 100 мА. В таблице приведены результаты измерений выходного тока фотоэлемента одной гра-

ни БДПС при малых перемещениях, при малой освещенности.

Таблица. Ток фотоэлемента БДПС при перемещении на малый угол

$\varphi$ , градус	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$I$ , мА	15,76	15,78	15,8	15,82	15,84	15,85	15,86	15,87	15,89

Из таблицы видно, что БДПС обладает чувствительностью менее 0,5 углового градуса. Максимальный диапазон измерения тока фотоэлемента БДПС контроллером наведения определяется по формуле:

$$D = \frac{I_{\max}}{\Delta I_{\min}}, \quad (7)$$

где  $\Delta I_{\min}$  – минимальное значение в разнице тока фотоэлемента при перемещении на 1 градус;  $I_{\max}$  – максимальный ток фотоэлемента.

Расчет по формуле (7) (при использовании таблицы) показывает, что при перемещении с одного до полутора углового градуса (изменение тока составляет 10 мкА) максимальный диапазон измерения тока составляет 10000. В этом случае необходимая разрядность АЦП микроконтроллера блока наведения на Солнце составит 14 разрядов ( $2^{14}=16384$ ), а с учетом возможности регулирования составит 16 разрядов. То есть целесообразно выбирать микроконтроллер с 16 разрядным встроенным АЦП.

Для уменьшения рывков и качаний при наведении рамы на Солнце в программном обеспечении КНС заложен несимметричный режим позиционирования, то есть торможение идет с пониженным ускорением и рывком по сравнению с разгоном [18]. На рис. 7 показана диаграмма режима позиционирования в электроприводе. В электроприводе обеспечивается максимальное быстродействие при перемещении во время микроцикла наведения. Это необходимо для минимизации затрат электрической энергии электроприводами при перемещении.

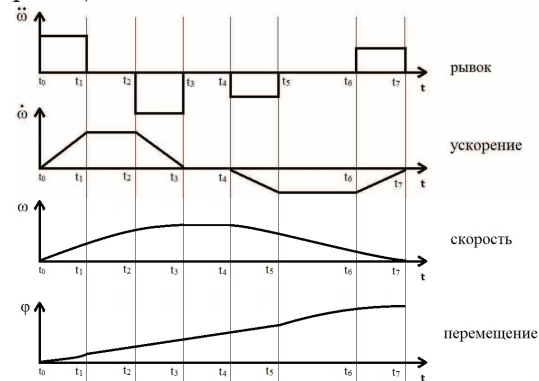


Рис. 7. Диаграмма режима позиционирования

На рис. 7 в интервале времени  $t_0-t_3$  происходит разгон двигателя с максимальным ускорением и

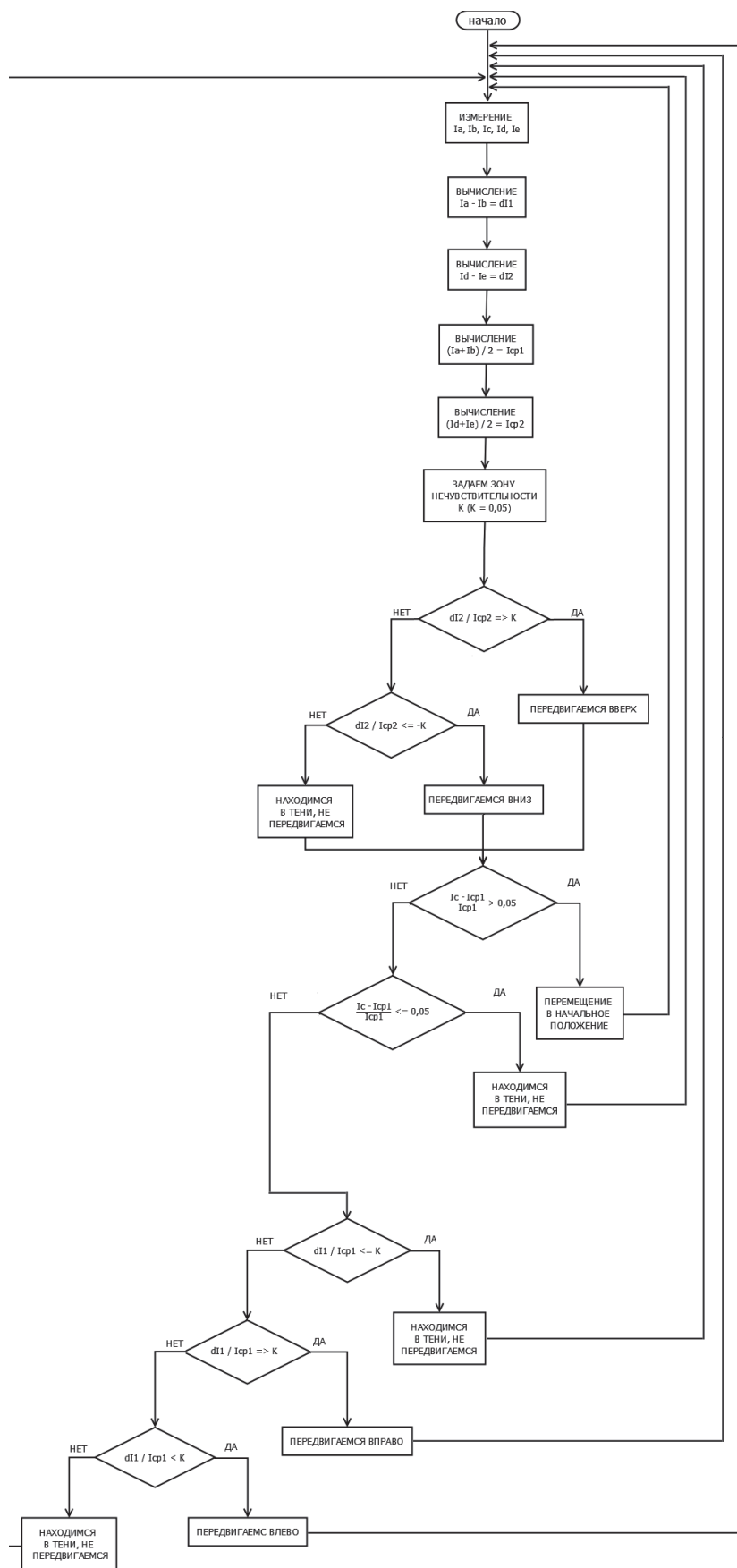


Рис. 8. Алгоритм наведения СБ на Солнце



рывком, в интервале  $t_4-t_7$  происходит торможение.

Алгоритм наведения СБ на Солнце с использованием разработанного БДПС приведен на рис. 8. Сначала измеряются токи в пяти фотоэлементах датчика ( $I_a, I_b, I_c, I_d, I_e$ ), далее определяется величина разницы в токе в противоположных гранях датчика ( $dI_1=I_a-I_b$ ;  $dI_2=I_d-I_e$ ) и находится относительная величина ошибки по току  $\left(\frac{dI_2}{I_{cp2}}; \frac{dI_1}{I_{cp1}}\right)$ .

Если относительная величина ошибки по току больше порогового значения (зоны нечувствительности  $K$ , которая может задаваться от 0,01...0,05), происходит одно из следующих действий: перемещение рамы влево или вправо, перемещение рамы вверх или вниз. Если относительная величина ошибки по току меньше порогового значения, то отсутствует перемещение.

Это означает что: либо рама с СБ точно направлена на Солнце, или рама с СБ находится в тени. Если величина тока в тыловой части датчика ( $I_c$ ) больше среднего значения тока в гранях датчика по азимуту  $\left(\frac{I_c - I_{cp1}}{I_{cp1}}\right)$  на 5 %, то это означает, что

Солнце светит с обратной стороны рамы. Это происходит на следующий день после восхода Солнца, при этом необходимо раму развернуть в начальное положение. При проведении испытаний двухкоординатной системы наведения в лабораторных условиях установлено, что если относительная величина ошибки меньше зоны нечувствительности на  $K=0,05$ , то обеспечивается точность наведения рамы на Солнце в 1 градус. При завершении цикла наведения (1 градус) необходимо выключать транзисторные преобразователи для исключения потребления энергии вентилями двигателями [19].

Разработанное программное обеспечение реализует следующие функции: автоматическое наведение

рамы с СБ на Солнце; ручное перемещение (от четырех кнопок) рамы с СБ по обеим координатам; возможность настройки в контроллере заданной скорости, ускорения и торможения в режиме позиционирования; возможность изменения частоты опроса БДПС и соответственно частоты дискретного перемещения при наведении (дискретное наведение солнечных батарей может проводиться через 1...10 мин); возможность изменения зоны нечувствительности ( $K$ ) [20].

#### Выводы

1. В фотоэлектрической электростанции с выходной мощностью до 2 кВт предложено использовать в системе наведения СБ на Солнце двухкоординатный электропривод, содержащий два вентильных двигателя серии ДБМ, микропроцессорную систему управления транзисторными преобразователями, адаптивный контур управления, построенный по принципу системы с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой с введением двух производных по заданию на вход контура регулирования тока электропривода.
2. Для фотоэлектрической электростанции разработаны контроллер наведения на Солнце и блок датчиков положения Солнца, обеспечивающие наведение механической рамы с СБ на Солнце с точностью 1 градус. При перемещении механической рамы организован несимметричный режим позиционирования с ограничением скорости вращения, ускорения, торможения и рывка вентильного двигателя.
3. Испытанный экспериментальный образец двухкоординатной системы наведения подтвердил теоретические расчеты.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований и экспериментальных разработок)» 2385.2014.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОАО Машиноаппарат. URL: <http://mashap.maverick.ru/> (дата обращения: 15.01.2014).
2. Бельский Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. – Л.: Изд-во ЛДНТП, Ленинградское отделение, 1987. – 29 с.
3. НПП Квант. URL: <http://www.npp-kvant.ru> (дата обращения: 19.01.2014).
4. ОАО ВНИТИ МЭ. URL: <http://www.vniimem.com> (дата обращения: 16.01.2014).
5. Reference manual STM32F100xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. URL: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/CD00246267.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00246267.pdf) (дата обращения: 08.01.2014).
6. Микропроцессорное управление электроприводами с вентилями двигателями для движителей необитаемых подводных аппаратов / В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, В.А. Бейнарович, Ю.А. Шиняков, А.Е. Лапа, К.В. Аржанов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 199–204.
7. Infineon: Power Transistor SPW47N60C3 URL: [http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3\\_Rev%5B1%5D.2.6\\_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42dff93492f](http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3_Rev%5B1%5D.2.6_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42dff93492f) (дата обращения: 07.01.2014).
8. PRODUCTS Power Management ics MOSFET Drivers Half Bridge. URL: <http://www.micrel.com/index.php/en/products/power-management-ics/mosfet-drivers/half-bridge.html> (дата обращения: 10.01.2014).
9. Микеров А.Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентильных двигателей. – СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 150 с.
10. Микеров А.Г. Торговые многофункциональные электроприводы малой мощности с бесконтактными синхронными электрическими машинами встраиваемого исполнения: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1992. – 300 с.
11. Удут С.Л. Синтез адаптивной системы управления электромеханическими преобразователями двухкоординатной поворотной платформы: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1996. – 200 с.

12. Справочник по теории автоматического управления // под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
13. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
14. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Комбинированные следящие системы. – Киев: Изд-во «Техника», 1978. – 264 с.
15. Самонастраивающаяся система регулирования скорости: пат. № 131508 U1 Рос. Федерация. № 2013111388; заявл. 13.03.13; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 2 с.
16. Самонастраивающаяся система регулирования скорости: А.с. 1462243 СССР; заявл. 28.09.1987; опубл. 28.02.1989, Бюл. № 8. – 4 с.
17. Датчик положения Солнца: пат. № 135126 U1 Рос. Федерация. № 2013117198; заявл. 15.04.13; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33. – 2 с.
18. Бейнарлович В.А. Электромеханические системы управления непрерывными технологическими процессами. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1989. – 280 с.
19. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, О.А. Теушаков, К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 133–138.
20. Аржанов К.В. Система наведения солнечных батарей на солнце // Силовая электроника и энергоэффективность: Матер. XIX Междунар. научно-техн. конф. – Украина, Алушта, 2013. – Т. 2. – С. 152–155.

Поступила 07.02.2014 г.

UDC 621.314

## TWO-COORDINATE SYSTEM OF POINTING SOLAR BATTERIES TO THE SUN

Kirill V. Arzhanov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 40. E-mail: rbhx@yandex.ru

*Relevance of the work is caused by the need to develop new highly effective systems pointing solar batteries to the Sun.*

**Objective:** development of two-coordinate guidance system of solar panels to the sun for photovoltaic power plants to provide the desired pointing accuracy and energy consumption minimization using a guidance system valve engines.

**Research methods are based on** the general theory of automatic control, electric theory, computational methods, and the use of modern instrumentation systems.

**Results:** The author has proposed to use in photovoltaic power station in the system of pointing solar battery to the Sun the two-axis actuator containing two valve engines of DBM series, microprocessor system of controlling transistor converters, adaptive control loop, constructed on the principle of the system with reference model and signal self-tuning with the introduction of two derivatives for setting electric drive current to a controller input. The author has developed for photovoltaic power station the controller of pointing to the Sun and a block of sensors of the Sun position provide guidance of mechanical frame with solar battery to the Sun with an accuracy of 1 degree. When position moving in the electric drive the asymmetric positioning mode with limited rotation speed, acceleration, deceleration and jerk valve engine is arranged.

### Key words:

Controller of pointing to the Sun, brushless motor, self-adjusting control system, positioning mode, sensor of the Sun position, the Sun automatic tracking.

### REFERENCES

1. OAO Mashinoapparat [Machine apparatus]. Available at: <http://mashap.maverick.ru/> (accessed 15 February 2014).
2. Belenkiy Yu.M., Zelenkov G.S., Mikerov A.G. *Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnykh momentnykh privodov* [Experience in development and application of contactless torque drives]. Leningrad, LDNTP, Leningrad Branch, 1987. 29 p.
3. NPP Kvant [Quantum]. Available at: <http://www.npp-kvant.ru> (accessed 19 January 2014).
4. OAO VNITI ME [VNITI ME]. Available at: <http://www.vnii-mem.com> (accessed 16 January 2014).
5. Reference manual STM32F100xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. Available at: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/CD00246267.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00246267.pdf) (accessed 8 January 2014).
6. Arzhanov V.V., Shurygin Yu.A., Beynarovich V.A., Shinyakov Yu.A., Lapa A.E., Arzhanov K.V. Mikroprotsessornoe upravlenie elektroprivodami s ventilnymi dvigatelyami dlya dvizhiteley neobitaemykh podvodnykh apparatov [Microprocessor control with electric motors for propulsion unmanned underwater vehicles]. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2012, no. 2 (26), P. 1, pp. 199–204.
7. Infineon: Power Transistor SPW47N60C3 Available at: [http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3\\_Rev%5B1%5D.2.6\\_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42df93492f](http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3_Rev%5B1%5D.2.6_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42df93492f) (accessed 7 January 2014).
8. PRODUCTS Power Management ics MOSFET Drivers Half Bridge. Available at: <http://www.micrel.com/index.php/en/products/power-management-ics/mosfet-drivers/half-bridge.html> (accessed 10 January 2014).
9. Mikerov A.G. *Elektromekhanicheskie datchiki i elektronnye komponenty upravlyaemykh ventilnykh dvigateley* [Electromechanical sensors and electronic components of controlled valve motors]. St. Petersburg, LETI Publ., 1999. 150 p.
10. Mikerov A.G. *Bortovye mnogofunktsionalnye elektroprivody maloy moshchnosti s beskontaktnymi sinkhronnymi elektricheskimi mashinami vstravaemogo ispolneniya* [Onboard electric multifunction low power contactless synchronous electrical machines embedded performance. Dr. Diss.] St. Petersburg, 1992. 300 p.

11. Udut S.L. *Sintez adaptivnoy sistemy upravleniya elektromekhanicheskimi preobrazovatelyami dukhkoordinatnoy povorotnoy platform. Dis. kand. tehn. nauk* [Synthesis of an adaptive control system of electromechanical transducers of two-coordinate turntable. Cand. Diss.]. Tomsk, 1996. 200 p.
12. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook on automatic control theory]. Ed. by Krasovsky A.A. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
13. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. *Upravlenie elektropriivodami* [Control of electrical drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p.
14. Zaytsev G.F., Steklov V.K. *Kombinirovannye sledyashchie sistemy* [Combined tracking systems]. Kiev, Tekhnika, 1978. 264 p.
15. Arzhanov V.V., Arzhanov K.V., Arzhanova A.V. *Samonastraivayushchiyasya sistema regulirovaniya skorosti* [Adaptive speed regulation system]. Patent RF, no. 2013111388, 2013.
16. Arzhanov V.V., Filipas A.A. *Samonastraivayushhiyasya sistema regulirovaniya skorosti* [Adaptive speed regulation system]. Patent USSR, no. 1462243, 1989.
17. Arzhanov K.V. *Datchik polozheniya Solntsa* [Sun position sensor]. Patent RF, no. 2013117198, 2013.
18. Beynarovich V.A. *Elektromekhanicheskie sistemy upravleniya nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami* [Electromechanical systems for continuous process]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1989. 280 p.
19. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arzhanov V.V., Osipov A.V., Teushchakov O.A., Arzhanov K.V. *Avtonomnaya fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka* [Autonomous photovoltaic power plant]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 133–138.
20. Arzhanov K.V. *Sistema navedeniya solnechnykh batarey na solntse* [The guidance system of solar panels to the sun]. *Materialy XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Silovaya elektronika i energoeffektivnost»* [Proc. XIX International scientific conference. Power Electronics and Energy Efficiency]. Ukraine, Alushta, 2013. pp. 151–155.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ( $U_{пр.}$ ,  $\Phi_i$ , но  $Al_2O_3$ ,  $\cos\alpha_i$ , max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 150 слов).

**Ключевые слова:** (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: <http://portal.tpu.ru/izvestiya>




**Редактирование** *А.С. Глазырин*  
**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Перевод на англ. язык и корректура** *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 11.04.2014. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,98. Уч.-изд. л. 15,36.  
Заказ 290-14. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822) 606-291, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru), [izv@tpu.ru](mailto:izv@tpu.ru)