

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

**ЭНЕРГЕТИКА**

Том 59, № 6

2016

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

**Учредители**

Электроэнергетический совет СНГ,  
Министерство образования Республики Беларусь,  
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базы данных:  
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,  
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

*22 декабря – День энергетика*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

- Фираго Б. И., Александровский С. В.** Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода . . . . . 507
- Гашимов А. М., Рахманов Н. Р., Гулиев Г. Б., Рахманов Р. Н., Мустафаев А. А.** Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме . . . . . 519
- Соленков В. В., Брель В. В.** Две конструкции встраиваемого в асинхронный двигатель электромеханического тормоза . . . . . 529
- Маляр В. С., Маляр А. В.** Установившиеся режимы и статические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети . . . . . 536
- Козловская В. Б., Калечиц В. Н.** Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием (Часть 1) . . . . . 549
- Зализный Д. И.** Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев . . . . . 563

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

- Сабуров Э. Н., Орехов А. Н., Онохин Д. А.** Конвективный теплообмен на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры . . . . . 573
- Bashতোই V. G., Reks A. G., Klimovich S. V., Volkova O. Yu.** To Evaluation Test of Quality of Magnetic Fluids for Magnetofluid Devices  
(**Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Климович С. В., Волкова О. Ю.** К оценке качества магнитных жидкостей для магнитожидкостных устройств) . . . . . 582
- Дмитриев С. М., Баринев А. А., Пронин А. Н., Сорокин В. Д., Хробостов А. Е.** Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением . . . . . 591

**ЮБИЛЕИ**

- Кафедре «Электрические станции» БНТУ – 70 лет . . . . . 604**

**НЕКРОЛОГ**

- Профессор Степанчук Климентий Филиппович . . . . . 609**

**Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2016 г.**

- I. Тематический указатель . . . . . 610**  
**II. Именной указатель . . . . . 613**

Редакционная коллегия

- С. Н. АСАМБАЕВ (Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан),  
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),  
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),  
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),  
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),  
П. В. ЖУКОВСКИИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),  
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),  
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),  
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),  
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),  
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),  
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),  
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
Е. Н. ПИСЬМЕННИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),  
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),  
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),  
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),  
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),  
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),  
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),  
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),  
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),  
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
Л. В. ШЕНЕЦ (Министерство энергетики Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь)

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.  
Регистрационный номер 1257

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

---

Подписано к печати 29.11.2016. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.  
Дата выхода в свет . 2016. Заказ .

---

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный  
технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.  
e-mail: energy@bntu.by energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2016

PROCEEDINGS OF THE CIS  
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS  
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

# ENERGETIKA

V. 59, No 6  
2016

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

## Founders

CIS Electric Power Council,  
Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

---

The Journal is included in the following databases:  
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,  
Lan, CyberLeninka, Socionet

*22<sup>nd</sup> December – Day of Power Engineer*

## CONTENTS

### ELECTRICAL POWER ENGINEERING

<b>Firago B. I., Aleksandrovsky S. V.</b> The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive .....	507
<b>Hashimov A. M., Rahmanov N. R., Guliyev G. B., Rahmanov R. N., Mustafayev A. A.</b> Probabilistic Flow Distribution as a Reaction to the Stochasticity of the Load in the Power System .....	519
<b>Solencov V. V., Brel V. V.</b> Two Designs of the Electromechanical Brake Embedded into an Asynchronous Motor .....	529
<b>Malyar V. S., Malyar A. V.</b> Established Modes and Static Characteristics of Three-Phase Asynchronous Motor Powered with Single Phase Network .....	536
<b>Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N.</b> Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply (Part 1) .....	549
<b>Zalizny D. I.</b> The Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors . . . .	563

### HEAT POWER ENGINEERING

<b>Saburov E. N., Orehov A. N., Onokhin D. A.</b> Convective Heat Exchange on the Lateral Surface of a Relatively Long Cyclone Chamber .....	573
<b>Bashtovoi V. G., Reks A. G., Klimovich S. V., Volkova O. Yu.</b> To Evaluation Test of Quality of Magnetic Fluids for Magnetofluid Devices .....	582
<b>Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E.</b> Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors .....	591

### JUBILEES

<b>70 years of the BNTU “Electric stations” Department .....</b>	604
--	-----

### OBITUARY

<b>Professor Clement Filippovich Stepanchuk .....</b>	609
---	-----

### List of Papers published in “Energetika” Journal, 2016

<b>I. Thematic index .....</b>	610
<b>II. Name index .....</b>	613

**Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk**

**Editorial Board**

- S. N. ASAMBAEV (*Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan*),  
W. T. WÓJCIK (*Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland*),  
V. V. GALAKTIONOV (*Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Russian Federation*),  
M. DADO (*Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic*),  
V. A. JANGIROV (*RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation*),  
K. V. DOBREGO (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*Deputy Editor-in-Chief*),  
I. V. ZHEZHELENKO (*Pryazovskiy State Technical University, Mariupol, Ukraine*),  
P. W. ZHUKOWSKI (*Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland*),  
A. S. KALINICHENKO (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*First Deputy Editor-in-Chief*),  
A. I. KIRILLOV (*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation*),  
A. KONNOV (*Lund University, Sweden*),  
B. K. MAKSIMOV (*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*),  
K. MAHKAMOV (*Northumbria University, United Kingdom*),  
A. A. MIKHALEVICH (*The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),  
E. S. MISHUK (*The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation*),  
NGO TUAN KIET (*Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam*),  
O. G. PENYAZKOV (*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),  
E. N. PISMENNYI (*National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine*),  
E. N. SABUROV (*Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation*),  
A.-S. S. SAUHATAS (*Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia*),  
V. S. SEVERYANIN (*Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus*),  
I. I. SERGEY (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*Deputy Editor-in-Chief*),  
B. S. SOROKA (*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*),  
V. A. STROEV (*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation*),  
V. I. TIMOSHPOLSKY (*LLC, Kiev, Ukraine*),  
E. V. TOROPOV (*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*),  
E. V. UŠPURAS (*Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania*),  
B. M. KHROUSTALEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),  
L. V. SHENETS (*Ministry of Energy of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*)

**Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk**

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office  
of Journals “Energetika” and “Science and Technique”

---

Passed for printing 29.11.2016. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Offset paper.  
Printed on risograph. Type face Times. Conventional printed sheet .  
An edition of 250 copies. Date of publishing 2016. Order list .

---

**ADDRESS**

Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-14  
e-mail: energy@bntu.by, energy-bntu@mail.ru  
<http://energy.bntu.by>

---

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.  
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518

УДК 621.31.83.52

## Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода

Б. И. Фираго<sup>1)</sup>, С. В. Александровский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** С целью улучшения энергетических показателей и упрощения системы частотно-регулируемого электропривода расширяется область применения синхронных частотно-регулируемых электроприводов с независимым заданием частоты. Используются синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов в различных промышленных установках, включая грузоподъемные машины и механизмы. По сравнению с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами синхронные имеют меньшие потери мощности, жесткие механические характеристики без обратной связи по скорости, самый простой закон частотного управления – пропорциональный, который, однако, обеспечивает максимальный электромагнитный момент двигателя неизменным при всех частотах благодаря постоянному магнитному потоку. В статье рассмотрено аналитическое исследование переходных процессов синхронного электропривода с учетом влияния демпферной обмотки при линейном изменении частоты питающего напряжения в переходном процессе. В результате анализа получены формулы, позволяющие рассчитывать угловую скорость ротора и электромагнитный момент двигателя при пуске, торможении, набросе и сбросе нагрузки, оценивая качество переходного процесса и отслеживая максимальную величину электромагнитного момента, который не должен превышать допустимой величины. Подтверждение правильности разработанной методики расчета переходных процессов синхронного электропривода получено сопоставлением расчетов по формулам с результатами имитационного моделирования электропривода на основе синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6 кВ.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, частотное управление, демпферная обмотка, переходные процессы

**Для цитирования:** Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.* 2016. Т. 59, № 6. С. 507–518

## The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive

B. I. Firago<sup>1)</sup>, S. V. Aleksandrovsky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** In order to improve the power indices and to simplify the system of frequency speed control the scope of application of synchronous variable-frequency electric drives with independent

---

**Адрес для переписки**

Фираго Бронислав Иосифович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/11,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-61  
eapu@bntu.by

**Address for correspondence**

Firago Bronislav I.  
Belarusian National Technical University  
65/11 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-61  
eapu@bntu.by

---

frequency setting is being expanded. The synchronous motors with electromagnetic excitation and permanent magnet excitation in various industrial settings, including load-lifting machines and mechanisms, are used. As compared with the asynchronous frequency-regulated electric drives the synchronous ones have lower power loss, harder mechanical characteristic without feedback for speed and the simplest law of frequency control, i. e., a proportional one that, however, provides the maximum electromagnetic torque of the motor constant at all frequencies, due to the constant magnetic flux. The article concerns an analytical study of transient processes of synchronous electric drive with consideration of the influence of damping winding when the motor supply voltage frequency varies linearly during the transient time. As a result of the analysis the formulas have been obtained that make it possible to calculate the angular velocity of the rotor and the electromagnetic torque of the motor at start-up, braking, and impingement and discharge of loads, evaluating the quality of the transition process and tracking the maximum value of the electromagnetic torque, that must not exceed the permissible value. Validation of the developed technique of calculation of transient processes of synchronous electric drive has been obtained by comparison of calculations according to the formulas with the simulation results of the electric drive on the basis of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type (power of 500 kW and voltage of 6 kV).

**Keywords:** synchronous motor, frequency control, damping winding, transients

**For citation:** Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2016) The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 59 (6), 507–518 (in Russian)

### Введение

В настоящее время электромеханические процессы частотно-регулируемого асинхронного электропривода достаточно хорошо изучены и отражены в технической литературе [1, 2]. В значительно меньшей степени это сделано для частотного регулирования синхронных двигателей (СД). В то же время наблюдается расширение области применения синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) как для вентильных двигателей постоянного (БДПТ) и переменного (СДПМ) тока с зависимым частотным управлением (или, по-другому, с частотным регулированием с самосинхронизацией) [2–7], так и для частотного регулирования с независимым заданием частоты [8–10]. Поэтому представляет интерес рассмотреть переходные процессы синхронного электропривода при независимом задании частоты изменения питающего напряжения и наличии демпферной (пусковой) обмотки на роторе синхронного двигателя. Для возможности аналитического исследования переходных процессов синхронного электропривода линеаризована угловая характеристика СД и принят постоянным статический момент нагрузки. Из разнообразия законов плавного изменения частоты напряжения, а следовательно, угловой синхронной скорости СД в переходном процессе остановимся на линейном, который наиболее распространен на практике.

В статье представлен аналитический метод расчета переходных процессов синхронного электропривода с учетом влияния демпферной обмотки, расположенной на роторе. Сопоставление результатов аналитического расчета с результатами моделирования конкретного электропривода показывает правильность разработанной методики.

### Структурная схема и математическая модель линейризованного синхронного электропривода

При частотном управлении трехфазным СД при постоянном магнитном потоке максимальный синхронный момент можно записать в виде

$$M_{\text{син},m} = \frac{3U_1(\alpha)E_1(\alpha)}{\omega_0(\alpha)X_{1d}(\alpha)}, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} = \frac{\omega_1}{\omega_{1\text{ном}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0\text{ном}}}, \quad (2)$$

$\alpha$  – относительная частота изменения питающего напряжения;  $f_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_0$  – текущие значения частоты, угловой частоты и синхронной угловой скорости ротора;  $f_{1\text{ном}}$ ,  $\omega_{1\text{ном}}$ ,  $\omega_{0\text{ном}}$  – номинальные значения указанных выше величин;  $U_1$ ,  $E_1$  – соответственно действующие значения фазного напряжения и ЭДС взаимоиндукции;  $X_{1d}$  – индуктивное сопротивление по продольной оси машины.

Если учесть, что ЭДС взаимоиндукции  $E_1$ , синхронная угловая скорость  $\omega_0$  и индуктивное сопротивление  $X_{1d}$  по продольной оси линейно зависят от относительной частоты  $\alpha$ :

$$E_1 = E_{1\text{ном}}\alpha; \quad (3)$$

$$\omega_0 = \omega_{0\text{ном}}\alpha; \quad (4)$$

$$X_{1d} = X_{1d,\text{ном}}\alpha, \quad (5)$$

то, как следует из (1), максимальный синхронный момент СД будет сохраняться на номинальном уровне, равном

$$M_{\text{син},m} = \frac{3U_{1\text{ном}}E_{1\text{ном}}}{\omega_{0\text{ном}}X_{1d,\text{ном}}}, \quad (6)$$

если фазное напряжение статора  $U_1$  изменять пропорционально относительной частоте  $\alpha$ , т. е.

$$U_1 = U_{1\text{ном}}\alpha. \quad (7)$$

В (3)–(7) величины с индексом «ном» определены при номинальной частоте статора, т. е. при  $\alpha = 1$ .

При линейризации угловой характеристики СД синхронный электромагнитный момент пропорционален углу рассогласования  $\theta$  в положении осей вращающегося магнитного поля статора и магнитного поля ротора

$$M_{\text{син}} = \frac{M_{\text{ном}}}{\theta_{\text{ном}}}\theta = b\theta, \quad (8)$$

где  $b$  – магнитная жесткость СД, обусловленная упругой связью ротора с вращающимся магнитным полем,  $b = \frac{M_{\text{ном}}}{\theta_{\text{ном}}}$ .

Магнитная жесткость СД аналогична упругой жесткости  $c$  в механической передаче при упругой угловой деформации  $\Delta\varphi$ , которая создает упругий момент

$$M_y = c\Delta\varphi.$$

Заметим, что магнитная и механическая жесткости имеют одинаковую размерность: Н·м/рад.

Угол рассогласования в положении магнитных осей статора и ротора, который еще называется углом нагрузки, определяется интегралом

$$\theta = \int (\omega_0 - \omega) dt,$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega$  – текущие значения угловой скорости магнитного поля и ротора СД.

При наличии демпферной обмотки на роторе СД в переходном процессе возникает асинхронный момент  $M_{ac}$ , пропорциональный отклонению угловой скорости ротора  $\omega$  от угловой скорости магнитного поля  $\omega_0$ :

$$M_{ac} = \beta(\omega_0 - \omega),$$

где  $\beta$  – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики, создаваемой демпферной (пусковой) обмоткой СД,  $\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0ном} s_k}$ ;  $M_k$ ,  $s_k$  – критический момент и критическое скольжение указанной линеаризованной механической характеристики.

Поскольку в рассматриваемом частотном управлении СД магнитный поток остается неизменным, то модуль жесткости  $\beta$  линеаризованной механической характеристики будет постоянным при всех частотах.

В переходном процессе суммарный момент синхронного двигателя будет состоять из суммы

$$M = M_{син} + M_{ac} = b \int (\omega_0 - \omega) dt + \beta(\omega_0 - \omega). \quad (9)$$

Добавляем к (9) уравнение движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (10)$$

где  $J$  – момент инерции электропривода, который принимается постоянным;  $M_c$  – статический момент, также принимаемый неизменным.

Запишем (9) и (10) в операторной форме:

$$M(p) = \left( \beta + \frac{b}{p} \right) [\omega_0(p) - \omega(p)]; \quad (11)$$

$$p\omega(p) = \frac{1}{J} [M(p) - M_c(p)]. \quad (12)$$

Выражениям (11), (12) соответствует структурная схема на рис. 1.

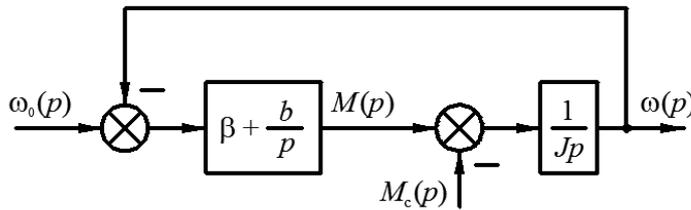


Рис. 1. Структурная схема линейризованного синхронного электропривода  
 Fig. 1. Structural diagram of linearized synchronous electric drive

Исследуем переходный процесс синхронного электропривода при линейном изменении частоты  $f_1$  питающего напряжения, а следовательно, и линейном изменении угловой скорости магнитного поля

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t + \omega_{0\text{нач}},$$

где  $\varepsilon_0$  – задаваемое угловое ускорение магнитного поля;  $\omega_{0\text{нач}}$  – начальная угловая скорость магнитного поля.

Математическую модель рассматриваемого синхронного электропривода при принятых допущениях можно представить системой уравнений:

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t + \omega_{0\text{нач}};$$

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) + b \int (\omega_0 - \omega) dt; \quad (13)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

#### Аналитическое исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода

На основании математической модели (13) можно получить дифференциальное уравнение для угловой скорости  $\omega$  ротора синхронного двигателя

$$T_M \tau \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \tau \frac{d\omega}{dt} + \omega = a + \varepsilon_0 t, \quad (14)$$

где  $a = \varepsilon_0 \tau + \omega_{0\text{нач}} = \text{const}$ ;  $T_M = \frac{J}{\beta}$ ;  $\tau = \frac{\beta}{b}$ ;  $T_M, \tau$  – постоянные времени.

Преобразуя (14) с учетом (13), находим дифференциальное уравнение для электромагнитного момента синхронного двигателя

$$T_M \tau \frac{d^2 M}{dt^2} + \tau \frac{dM}{dt} + M = M_c + M_{\text{дин},0}, \quad (15)$$

где  $M_{\text{дин},0}$  – задаваемый динамический момент в переходном процессе,  $M_{\text{дин},0} = J \varepsilon_0$ .

Для дифференциальных уравнений (14) и (15) имеем одно характеристическое выражение

$$T_M \tau p^2 + \tau p + 1 = 0 \quad (16)$$

с корнями

$$p_{1,2} = -\zeta \pm \frac{\sqrt{m(m-4)}}{2\tau},$$

где  $\zeta = \frac{1}{2T_M}$  – коэффициент затухания;  $m = \frac{\tau}{T_M}$  – отношение постоянных времени.

При  $m < 4$  получаем комплексно сопряженные корни

$$p_{1,2} = -\zeta \pm j\Omega_p,$$

где  $\Omega_p$  – резонансная частота колебаний,

$$\Omega_p = \frac{\sqrt{m(4-m)}}{2\tau};$$

$$\Omega_p = \sqrt{\Omega_0^2 - \zeta^2};$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{b}{J}} = \frac{1}{\sqrt{T_M \tau}},$$

$\Omega_0$  – собственная частота электромеханических колебаний синхронного электропривода.

Для дифференциального уравнения (14) можно записать общее решение в виде

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 t + e^{-\zeta t} (A e^{j\Omega_p t} + B e^{-j\Omega_p t}), \quad (17)$$

где  $A, B$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$\omega(t=0) = \omega_{\text{нач}};$$

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{J} = \varepsilon_{\text{нач}}.$$

Используем эти начальные условия для (17) и найдем постоянные интегрирования  $A$  и  $B$ , которые после подстановки в (17) и необходимых преобразований позволяют получить окончательное выражение для угловой скорости синхронного двигателя в переходном процессе

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 t + e^{-\zeta t} \left[ \Delta\omega_{\text{нач}} \cos(\Omega_p t) + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}} + \zeta \Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right], \quad (18)$$

где  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}} - \omega_{\text{нач}}$ .

Для дифференциального уравнения (15) начальные условия будут следующими:

$$M(t=0) = M_{\text{нач}};$$

$$\left. \frac{dM}{dt} \right|_{t=0} = b[\tau(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}}) - \Delta\omega_{\text{нач}}]. \quad (19)$$

Используя (19) совместно с (14) для нахождения решения уравнения (15), после преобразований получаем выражение для электромагнитного момента синхронного двигателя в переходном процессе

$$M = M_c + M_{\text{дин},0} + e^{-\zeta t} \left[ (M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta(M_{\text{нач}} - M_c - M_{\text{дин},0}) + \beta(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{нач}}) + b\Delta\omega_{\text{нач}}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right]. \quad (20)$$

Далее исследуем пуск электропривода при наличии статического момента  $M_c > 0$ . Пусть  $\omega_{0\text{нач}} = 0$ , тогда

$$\omega_0 = \varepsilon_0 t.$$

При  $M < M_c$  угловая скорость  $\omega = 0$  и электромагнитный момент двигателя изменяются по закону

$$M = \beta\varepsilon_0 \tau t + b\varepsilon_0 \frac{t^2}{2} = b\varepsilon_0 t \left( \tau + \frac{t}{2} \right).$$

Из этого выражения при  $M = M_c$  находим время задержки движения

$$t_3 = -\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{2M_c}{b\varepsilon_0}}.$$

Следовательно, при наличии статического момента время разгона электропривода разбивается на три этапа. Первый этап пуска электропривода определяется соотношениями:  $0 \leq t \leq t_3$ ;  $\omega = 0$ ;  $M < M_c$

$$M = b\varepsilon_0 t \left( \tau + \frac{t}{2} \right).$$

Временные границы второго этапа находятся в пределах

$$t_3 \leq t \leq t_0,$$

где  $t_0$  – время линейного изменения угловой скорости  $\omega_0$  магнитного поля при заданной величине углового ускорения  $\varepsilon_0$  и конечном значении угловой скорости  $\omega_{0\text{кон}}$  магнитного поля,  $t_0 = \frac{\omega_{0\text{кон}}}{\varepsilon_0}$ .

На втором этапе удобнее перенести начало отсчета времени на начало движения ротора, тогда новое время будет определяться выражением

$$t' = t - t_3,$$

при этом  $t' = t_0 - t_3$ , а временной интервал:  $0 \leq t' \leq t'_0$ .

Для второго этапа имеем начальные условия:  $M_{\text{нач}} = M_c$ ;  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ;  $\varepsilon_{\text{нач}} = 0$ ;  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}}(t') - \omega = \omega_{0\text{нач}}(t) = \varepsilon_0 t_3$ .

С учетом этих начальных условий из (18) получаем уравнение для угловой скорости ротора на втором этапе разгона

$$\omega(t') = \varepsilon_0(t_3 + t') - e^{-\zeta t'} \left[ \varepsilon_0 t_3 \cos(\Omega_p t') + \frac{\varepsilon_0(1 + \zeta t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t') \right].$$

Для электромагнитного момента двигателя на втором этапе разгона находим следующее уравнение:

$$M(t') = M_c + M_{\text{дин},0} - e^{-\zeta t'} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t') + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - b\varepsilon_0(\tau + t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t') \right].$$

В конце второго этапа разгона электропривода определяем значения:

- времени  $t' = t'_0 = t_0 - t_3$ ;
- угловой скорости ротора

$$\omega(t'_0) = \omega_{0\text{кон}} - e^{-\zeta t'_0} \left[ \varepsilon_0 t_3 \cos(\Omega_p t'_0) + \frac{\varepsilon_0(1 + \zeta t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'_0) \right]; \quad (21)$$

- электромагнитного момента

$$M(t'_0) = M_c + M_{\text{дин},0} - e^{-\zeta t'_0} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t'_0) + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - b\varepsilon_0(\tau + t_3)}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'_0) \right]. \quad (22)$$

Как следует из (21) и (22), в конце второго этапа разгона электропривода еще не наступает установившийся режим работы. Поэтому будет третий этап разгона, когда угловая скорость магнитного поля достигает своего конечного значения

$$\omega_0(t_0) = \omega_{0\text{кон}} = \text{const},$$

но начальные условия для этого переходного процесса не нулевые.

В связи с тем что в конце второго и начале третьего этапа разгона заданное угловое ускорение магнитного поля  $\varepsilon_0$  скачком изменяется от конечного до нулевого значения, формулы (18) и (20) уже нельзя использовать для дальнейшего анализа переходного процесса на третьем этапе разгона. В [2] приводится уравнение (10.210) для угловой скорости синхронного электродвигателя при  $\omega_0 = \text{const}$  и ненулевых начальных условиях, которым мы и воспользуемся. В этом уравнении обозначено

$$\Delta\omega_0 = \omega_0 - \omega_{\text{нач}},$$

что для начальных условий третьего этапа соответствует выражению

$$\Delta\omega_0 = \omega_{0\text{кон}} - \omega(t'_0).$$

Принимая во внимание обозначение времени на третьем этапе как

$$t'' = t - t_0, \quad 0 \leq t'' \leq (6 \div 8)T_M,$$

записываем уравнение угловой скорости синхронного двигателя на этом этапе разгона

$$\omega(t'') = \omega_{0\text{кон}} - e^{-\zeta t''} \left[ \Delta\omega_0 \cos(\Omega_p t'') - \frac{\Omega_0^2 (\theta_{\text{нач}} - \theta_c) + \zeta \Delta\omega_0 \sin(\Omega_p t'')}{\Omega_p} \right], \quad (23)$$

где  $\theta_{\text{нач}}$ ,  $\theta_c$  – соответственно начальный и статический углы нагрузки синхронного двигателя для третьего этапа разгона.

С учетом того, что в конце второго этапа разгона можно принять  $e^{-\zeta t'_0} \approx 0$ , так как  $t'_0 > 6T_M$ , начальный угол нагрузки можно определить как

$$\theta_{\text{нач}} = \frac{M(t'_0)}{b} = \frac{M_c + M_{\text{дин},0}}{b}.$$

Тогда

$$\theta_{\text{нач}} - \theta_c = \frac{M_{\text{дин},0}}{b}.$$

По указанной выше причине электромагнитный момент синхронного двигателя на третьем этапе разгона будет рассчитываться исходя из уравнения движения

$$M(t'') = M_c + J \frac{d\omega(t'')}{dt''}. \quad (24)$$

Взяв производную по времени  $t''$  от (23) и подставив в (24), после преобразований получаем уравнение для электромагнитного момента синхронного двигателя на третьем этапе разгона электропривода

$$M(t'') = M_c + e^{-\zeta t''} \left[ (M_{\text{дин},0} + \beta \Delta\omega_0) \cos(\Omega_p t'') - \frac{b \Delta\omega_0 - \zeta M_{\text{дин},0}}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t'') \right].$$

Торможение синхронного электропривода рассмотрим при линейном снижении частоты питающего напряжения с установившегося состояния, принимая во внимание начальные условия  $\Delta\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}} - \omega_{\text{нач}} = 0$ , так как  $\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}}$ ;  $M_{\text{нач}} = M_c$ , и соотношения  $\varepsilon_0 < 0$ ;  $M_{\text{дин},0} = J\varepsilon_0 < 0$ .

При торможении угловая скорость магнитного поля уменьшается по линейному закону  $\omega_0 = \omega_{0\text{нач}} - \varepsilon_0 t$ , а начальное угловое ускорение

$$\varepsilon_{\text{нач}} = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{J} = 0.$$

Используя эти данные в (18), находим выражение для угловой скорости двигателя

$$\omega = \omega_{0\text{нач}} - \varepsilon_0 t + \frac{\varepsilon_0}{\Omega_p} e^{-\zeta t} \sin(\Omega_p t).$$

Начальные условия переходного процесса при торможении электропривода с установившегося состояния, учтенные в (20), позволяют найти уравнение для электромагнитного момента двигателя

$$M = M_c - M_{\text{дин},0} + e^{-\zeta t} \left[ M_{\text{дин},0} \cos(\Omega_p t) + \frac{\zeta M_{\text{дин},0} - \beta \varepsilon_0}{\Omega_p} \sin(\Omega_p t) \right].$$

Если  $M_c > |M_{\text{дин},0}|$ , то при реактивном статическом моменте торможение электропривода заканчивается, когда скорость двигателя достигает нулевого значения.

Для иллюстрации теоретических исследований проведены расчеты по полученным формулам, результаты которых сопоставлены с результатами компьютерного моделирования электропривода с синхронным двигателем типа СДЗ 13-34-6 мощностью 500 кВт и напряжением 6000 В при коэффициенте инерции  $K_J = 4$ , относительном статическом моменте  $\mu_c = 0,4$  и времени линейного изменения угловой скорости магнитного поля  $t_0 = 10$  с (рис. 2), а также при набросе нагрузки от  $\mu_c = 0,4$  до  $\mu_c = 1,0$  (рис. 3).

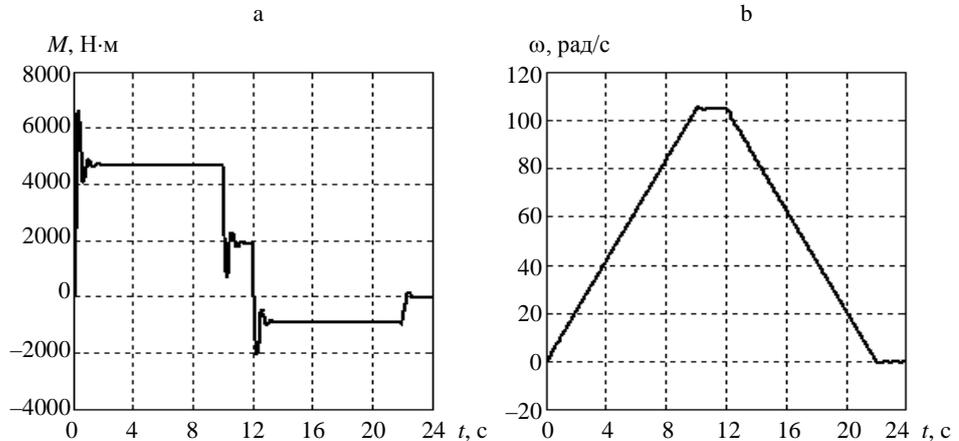


Рис. 2. Переходные процессы при разгоне и торможении синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 при линейном изменении частоты питающего напряжения: а – электромагнитный момент; б – угловая скорость двигателя

Fig. 2. Transients during acceleration and braking of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type with a linear change of frequency of supplying voltage: а – electromagnetic torque; б – motor angular velocity

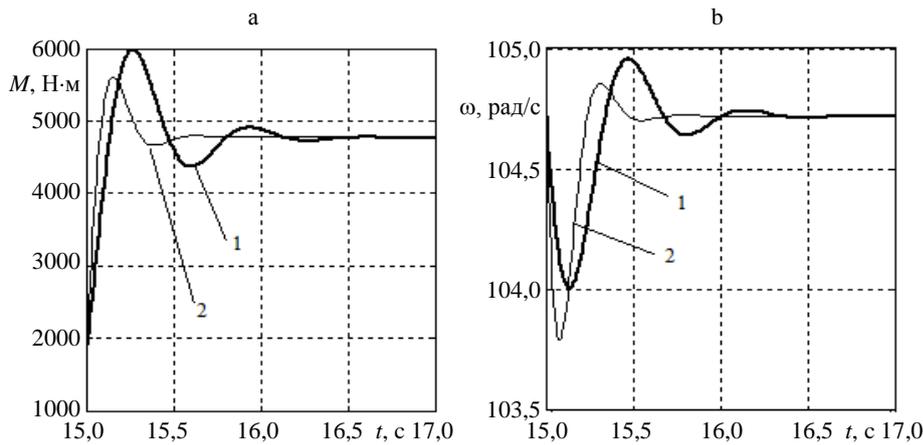


Рис. 3. Переходные процессы синхронного двигателя типа СДЗ 13-34-6 при набросе нагрузки от  $\mu_c = 0,4$  до  $\mu_c = 1,0$ : а – электромагнитный момент; б – угловая скорость двигателя; 1 –  $K_J = 4$ ; 2 –  $K_J = 1,6$

Fig. 3. Transients of the synchronous motor of the SD3 13-34-6 type the type synchronous motor when impingement of loads from  $\mu_c = 0.4$  to  $\mu_c = 1.0$ : а – electromagnetic torque; б – rotor angular velocity; 1 – factor of inertia  $K_J = 4$ ; 2 –  $K_J = 1.6$

### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика аналитического расчета переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода при линейном изменении частоты напряжения и учете влияния демпферной обмотки.

2. Сопоставление результатов аналитического расчета с результатами имитационного моделирования электропривода с синхронным двигателем типа СДЗ 13-34-6 (мощность 500 кВт, напряжение 6 кВ) показало, что результаты совпадают.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 1998. 172 с.
2. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
3. Зиннер, Л. Я. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока / Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.
4. Овчинников, И. Е. Теория вентильных электрических двигателей / И. Е. Овчинников. Л.: Наука, 1985. 164 с.
5. Мохсен, А. Перспективный электропривод мостовых кранов / А. Мохсен // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації: зб. наук. праць VI Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук, КДПУ, 2008. С. 57–61.
6. Бешта, О. С. Обґрунтування доцільності використання синхронних двигунів з постійними магнітами з вбудованими магнітами / О. С. Бешта, О. В. Балахонцев, С. Г. Фурса // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. 2010. № 4 (63), Ч. 2. С. 73–75.

7. Толочко, О. І. Особенности векторного керування синхронними двигунами при врахуванні втрат у сталі / О. І. Толочко, В. В. Божко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика. 2012. № 3 (19). С. 45–47.
8. Брусин, Д. Э. Электрические машины / Д. Э. Брусин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. Ч. 2. 355 с.
9. Осин, И. Л. Электрические машины: синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.
10. Jakubec, M. Energooszczednosc i Kompatybilnosc w Napedach Elektrycznych / M. Jakubec. Katowice, 2005. 134 p.

Поступила 21.06.2016 Подписана в печать 22.08.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Pozdeev A. D. (1998) *Electromagnetic and Electromechanical Processes in Frequency Controlled Asynchronous Electric Motor Drives*. Cheboksary: Chuvash University Publ. 172 (in Russian).
2. Firago B. I., Pawlaczyk L. B. (2006) *Regulated Alternative Current Electric Drives*. Minsk, Technoperspektiva Publ. 363 (in Russian).
3. Zimmer L. Ya., Skorospeshkin A. I. (1981) *DC and AC Valve Motors*. Moscow, Energoizdat Publ. 136 (in Russian).
4. Ovchinnikov I. E. (1985) *Theory of Valve Electric Motors*. Leningrad, Nauka. 164 (in Russian).
5. Mohsen A. (2008) Promising Electrical Drive for Bridge Cranes. *Elektromekhanichni Sistemi, Metody Modeliuvannia ta Optimizatsii. Zbirnik Naukovikh Prats VI Vseukraïnskoï Naukovo-Tekhnichnoï Konferentsii Molodikh Uchenikh i Spetsialistiv* [Electromechanical Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference Proceedings of the VI Science and Technical Conference of Beginners in Science and Industry]. Kremenchuk, KPSU, 57–61 (in Russian).
6. Beshta A. S., Balahontsev A. V., Fursa S. G. (2010) Ground of Expedience of the Use of Synchronous Engines with Permanent Magnets with Built-In Magnets. *Visnik Kremenchutskogo Derzhavnogo Universitetu Imeni Mikhaïla Ostrogradskogo* [Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University], (63) 4, part 2, 73–75 (in Ukrainian).
7. Tolochko O. I., Bozhko V. V. (2012) Features of Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Taking into Account Core Losses. *Elektromekhanichni i Energozberigaiuchi Sistemi. Tematichnii Vipusk "Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teoriia i Praktika"* [Electromechanical and Energy Saving System. Thematic issue "Problems of Automated Electric Drive: Theory and Applications"], 19 (3), 45–47 (in Ukrainian).
8. Bruskin D. E., Zorochovich A. E., Hvostov V. S. (1987) *Electric Machines. Part 2*. Moscow, Vysshaya Shkola. 355 (in Russian).
9. Osin I. L., Shakarian Yu. G. (1990) *Electric Machines: Synchronous Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 304 (in Russian).
10. Jakubec M. (2005) *Energooszczednosc i Kompatybilnosc w Napedach Elektrycznych* [Energy Saving and Compatibility in Electrical Drives]. Katowice, Komel. 134 (in Polish).

Received: 21 June 2016

Accepted: 22 August 2016

Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-519-528

УДК 621.311

## Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме

А. М. Гашимов<sup>1</sup>, Н. Р. Рахманов<sup>1</sup>, Г. Б. Гулиев<sup>1</sup>, Р. Н. Рахманов<sup>1</sup>,  
А. А. Мустафаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт  
энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** В существующей практике для анализа и управления режимами энергосистем в основном используются детерминистические подходы, которые реализуются в виде известных методов и моделей расчета установившихся и переходных режимов. С помощью этих методов можно получить решения только при фиксированных параметрах схемы системы и при допущении, что задаваемые в узлах активные и реактивные мощности нагрузки и генерации сохраняются неизменными. В условиях реальной эксплуатации стохастический характер изменчивости потребления создают случайные флуктуации напряжений в узлах и перетоков мощности в линиях электрической сети энергосистемы. Такие случайные флуктуации режима могут быть оценены с помощью моделирования вероятностного потокораспределения. В статье приводятся результаты исследования влияния глубины случайных флуктуаций мощности нагрузки системы на вероятности распределения напряжений в узлах и потоки активной и реактивной мощности в линиях. Моделирование вероятностного потокораспределения в условиях стохастического изменения нагрузки выполняется для разных уровней флуктуаций и при утяжелении режима системы, вплоть до пиковой мощности нагрузки. Тестовые исследования для количественной оценки влияния стохастической изменчивости нагрузки на вероятностное распределение параметров режимов проводили на примере электрической сети реальной энергосистемы. Сравнивали результаты моделирования вероятностного потокораспределения для данных флуктуаций нагрузки, представляемых в виде дискретных выборок величин активной мощности, получаемых аналитическим путем методом Монте-Карло и данных реальных замеров их значений в исследуемой сети.

**Ключевые слова:** вероятностное потокораспределение, плотность распределения, флуктуация нагрузки, распределение потерь, распределение напряжений

**Для цитирования:** Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме / А. М. Гашимов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 519–528

---

### Адрес для переписки

Гашимов Ариф Мамедович  
Азербайджанский научно-исследовательский  
и проектно-изыскательский  
институт энергетики  
просп. Г. Зардаби, 94,  
Az1141, г. Баку, Азербайджанская Республика  
Тел.: +994 012 538-76-46  
ahashimov@azerenerji.gov.az

### Address for correspondence

Hashimov Arif M.  
Azerbaijan Scientific-Research  
and Design-Prospecting Power  
Engineering Institute  
94 G. Zardabi Ave.,  
Az1141, Baku, the Azerbaijani Republic  
Tel.: +994 012 538-76-46  
ahashimov@azerenerji.gov.az

---

## Probabilistic Flow Distribution as a Reaction to the Stochasticity of the Load in the Power System

A. M. Hashimov<sup>1)</sup>, N. R. Rakhmanov<sup>1)</sup>, G. B. Guliyev<sup>1)</sup>, R. N. Rakhmanov<sup>1)</sup>,  
A. A. Mustafayev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, the Azerbaijani Republic)

**Abstract.** For the analysis and control of power systems deterministic approaches that are implemented in the form of well-known methods and models of calculation of steady-state and transient modes are mostly use in current practice. With the use of these methods it is possible to obtain solutions only for fixed circuit parameters of the system scheme and assuming that active and reactive powers as well as generation in nodal points of the network remain the same. In reality the stochastic character of power consumption cause the casual fluctuations of voltages at the nodes and power flows in electric power lines of the power system. Such casual fluctuations of operation can be estimated with the use of probabilistic simulation of the power flows. In the article the results of research of the influence of depth of casual fluctuations of the load power of the system on the probability distribution of voltage at nodes as well as on the flows of active and reactive power in the lines are presented. Probabilistic modeling of flow under stochastic load change is performed for different levels of fluctuations and under loading of the mode of the system up to peak load power. Test study to quantify the effect of stochastic variability of loads on the probabilistic distribution parameters of the modes was carried out on behalf of the electrical network of the real power system. The results of the simulation of the probability flow distribution for these fluctuations of the load, represented in the form of discrete sample values of the active power obtained with the use of the analytical Monte-Carlo method, and real data measurements of their values in the network under examination were compared.

**Keywords:** probabilistic flow distribution, density of the distribution, load fluctuation, distribution losses, voltage distribution

**For citation:** Hashimov A. M., Rakhmanov N. R., Guliyev G. B., Rakhmanov R. N., Mustafayev A. A. (2016) Probabilistic Flow Distribution as a Reaction to the Stochasticity of the Load in the Power System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 59 (6), 519–528 (in Russian)

### Введение

Управление потокораспределением в электрической сети энергосистемы имеет важное значение для обеспечения устойчивости и экономичности ее функционирования. В традиционной практике решение этой проблемы предполагает детерминистический характер изменчивости задаваемых величин мощности для нагрузок и источников. При принятых условиях детерминистичности исходных данных для определения потокораспределения в настоящее время предлагаются несколько методов расчета установившихся режимов [1–3]. Хотя эти способы достаточно обоснованы и хорошо развиты, вместе с тем с помощью детерминистических методов можно получать оценку только для точечного состояния системы. Полученные результаты детерминистического потокораспределения (ДПР) не учитывают факторы неопределенности, вызывающие изменчивость состояния системы от случайной изменчивости генерации и нагрузки. Для исследования вероятностных режимов, имеющих место в реальной энергосистеме при учете стохастической изменчивости мощностей источников и нагрузок, следует применять вероятностные подходы, методы нечеткого множества и интервального анализа [4–8].

Методы расчета вероятностного потокораспределения (ВПР) делятся на численные и аналитические. Численные методы базируются на моделировании случайных временных выборок для величин мощности нагрузки с помощью модели Монте-Карло, а аналитические используют описания этих выборок в виде свертки или кумулянтов [7, 8]. Метод свертки основан на представлении стохастических переменных в виде распределения вероятностей, в то время как метод кумулянтов – на их описании в координатах моментов и кумулянтов.

В настоящее время имеется достаточное число публикаций, посвященных развитию и численным, и аналитическим методам моделирования ВПР, практическая необходимость в расчетах которого в основном вызвана увеличением доли прерывистой генерации от возобновляемых источников (ветровых и солнечных станций) и реальным фактом стохастической изменчивости потребления [9–13]. Подходы, предлагаемые в этих работах, в основном связаны с усовершенствованием алгоритма ВПР, эффективностью их применимости при решении задач планирования и регулирования режима системы по напряжению.

Авторами статьи на основе замеров мощности нагрузки для разных периодов внутрисуточного графика энергосистемы построены функции плотности распределения флуктуационных изменений этих мощностей. Проведено моделирование установившегося режима системы с учетом стохастичности нагрузки, выполнен анализ их влияния на изменчивость напряжений в узлах, потоков мощности и потерь в электрической сети системы.

### Метод и модель расчета вероятностного потокораспределения

В целях получения вероятностных характеристик для потоков активной и реактивной мощностей и напряжений в сети и их сравнительного анализа при разных уровнях флуктуаций нагрузки применяли метод Монте-Карло. Модель установившегося режима принимали в виде нелинейных уравнений, включающих следующие соотношения.

1. Уравнения для узлов:

$$P_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}); \quad (1)$$

$$Q_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}). \quad (2)$$

2. Уравнения для связей:

$$P_{ik} = -t_{ik} G_{ik} U_i^2 + U_i U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}); \quad (3)$$

$$Q_{ik} = t_{ik} B_{ik} U_i^2 - B_{ik} U_i^2 + U_i U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}); \quad (4)$$

$$Q_{i,ш} = U_i^2 B_{i,ш}; \quad (5)$$

$$U_k = U_i - \Delta U_{ik}(P_{ik}, Q_{ik}, U_i); \quad (6)$$

$$\delta_k = \delta_i - \Delta \delta_{ik}(P_{ik}, Q_{ik}, U_i), \quad (7)$$

где  $P_i, Q_i$  – инъекция активной и реактивной мощностей (генерация минус нагрузка) в узле  $i$ ;  $P_{ik}, Q_{ik}$  – поток активной и реактивной мощностей в линии  $ik$  со стороны узла  $i$ ;  $U_i, U_k$  – величина напряжений соответственно в узлах  $i, k$ ;  $\delta_{ik}$  – разность углов между векторами напряжений узлов  $i$  и  $k$ ;  $G_{ik}, B_{ik}$  – вещественная и мнимая составляющие матрицы полной проводимости;  $Q_{i,ш}$  – реактивная мощность шунта в узле  $i$ ;  $B_{i,ш}$  – мнимая часть проводимости шунта в узле  $i$ .

Моделирование установившегося режима через (1)–(7) широко используется в программах ДПР. В численных методах вероятностного потокораспределения также применяется данная модель, при этом для проведения расчетов ВПР методом Монте-Карло уравнения (1)–(7) должны решаться много раз в соответствии с объемом случайной выборки флуктуаций мощности нагрузки системы.

По результатам повторяющихся расчетов потокораспределения определяли выборки случайной изменчивости параметров состояния системы ( $P_{ik}, Q_{ik}, U_i, U_k$ ) и их соответствующие функции распределения.

### Вероятностная модель флуктуаций нагрузки

В условиях реальной эксплуатации мощность, потребляемая нагрузкой энергосистемы, претерпевает сложные изменения в виде колебаний регулярного и нерегулярного характера. Примером регулярных колебаний являются широко используемые суточные графики нагрузки, которые для большинства систем имеют типичную форму, определяемую соответствующим набором показателей. Суточные колебания нагрузки, сохраняя свою форму и цикличность, могут существенно изменяться в разные последовательные сутки. Суточные изменения активной мощности нагрузки системы «Азерэнерджи» с комбинированным составом потребителей (промышленно-коммунальные потребители), построенных на основе 30-минутных измерений, приведены на рис. 1. Изменение потребления мощности в часы минимума нагрузки находится в интервале 130–170 МВт, соответственно в часы максимума – в интервале 210–310 МВт. На рис. 1 показано изменение средней мощности в течение суток. Природа медленных случайных колебаний нагрузки относительно среднесуточной кривой в разные периоды суток вызвана в основном изменением внешних условий: схемы, отклонением частоты, профиля напряжения в электрической сети и др. Характер этих изменений нагрузки достаточно подробно изучен в [14].

Стохастическая изменчивость потребляемой мощности нагрузки во внутрисуточных кратковременных периодах – от нескольких минут до десятков минут (которые в основном определяются процессами внутри самой

нагрузки) – возникают от технологических процессов отдельных потребителей. Такие флуктуационные процессы в нагрузке приводят к вероятностной изменчивости параметров режима – к случайным колебаниям напряжения в узлах и потоков активной и реактивной мощностей в элементах электрической сети.

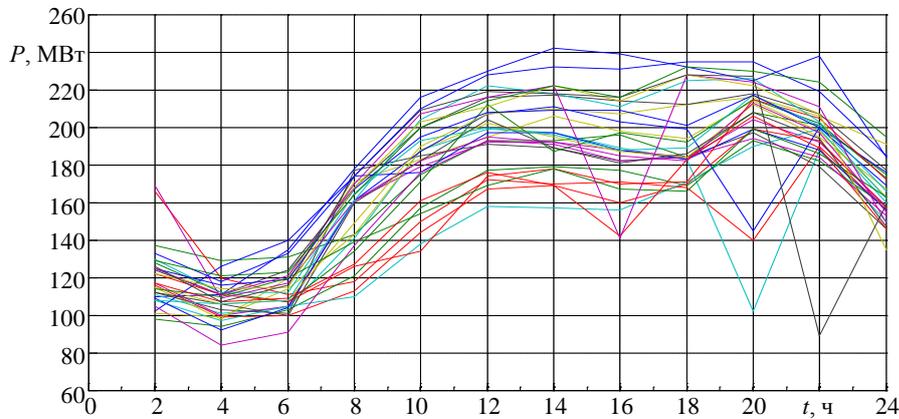


Рис. 1. Суточные графики нагрузки Апшеронской региональной сети системы «Азербээнержи» за октябрь 2015 г.

Fig. 1. Daily load curve for a typical distributed network (on behalf of Absheron region network of "Azerbaijan Power System") for one month (October 2015)

Обычно вероятностные характеристики флуктуаций мощности нагрузки энергосистем имеют схожесть с вероятностной характеристикой нормального случайного процесса [10–12]. Основываясь на этом, для любого момента времени  $t$  значения величины флуктуации мощности нагрузки можно получить путем обратного преобразования функции нормального распределения [10]:

$$\Delta P_{n(t)} = \exp \left( \overline{\Delta P_{n(t)}} \xi_{(t)} + \frac{(\Delta \tilde{P}_{n(t)} \xi_{(t)})^2}{2} \right);$$

$$P_{n(t)} = P_{0,n(t)} \Delta P_{n(t)},$$

где  $\Delta P_{n(t)}$  – величина стохастической изменчивости нагрузки в момент  $t$ ;  $\overline{\Delta P_{n(t)}}$ ,  $\Delta \tilde{P}_{n(t)}$  – статистическая средняя и стандарт отклонения стохастически изменяющейся части нагрузки;  $\xi_{(t)}$  – равномерно распределенное случайное число;  $P_{0,n(t)}$  – мощность нагрузки для принятого базисного режима.

### Результаты моделирования вероятностного потокораспределения при стохастической изменчивости нагрузки

Исследование влияния стохастических процессов в нагрузке оценивается на основе вероятностных характеристик параметров, определяющих со-

стояние энергосистемы, – величин узловых напряжений, перетоков и потерь мощности в электрической сети. В качестве примера схемы для анализа ВПР в зависимости от уровня флуктуационных процессов в системе рассматривали схему участка распределительной электрической сети системы «Азербайджан» с общей мощностью нагрузки порядка 2000 МВт. Упрощенная схема сети исследуемого района системы, в которой флуктуации суммарной нагрузки имитируются в виде стохастических процессов потребления в узле 110 кВ Мушвиг (п/ст 220/110 кВ), приведена на рис. 2.

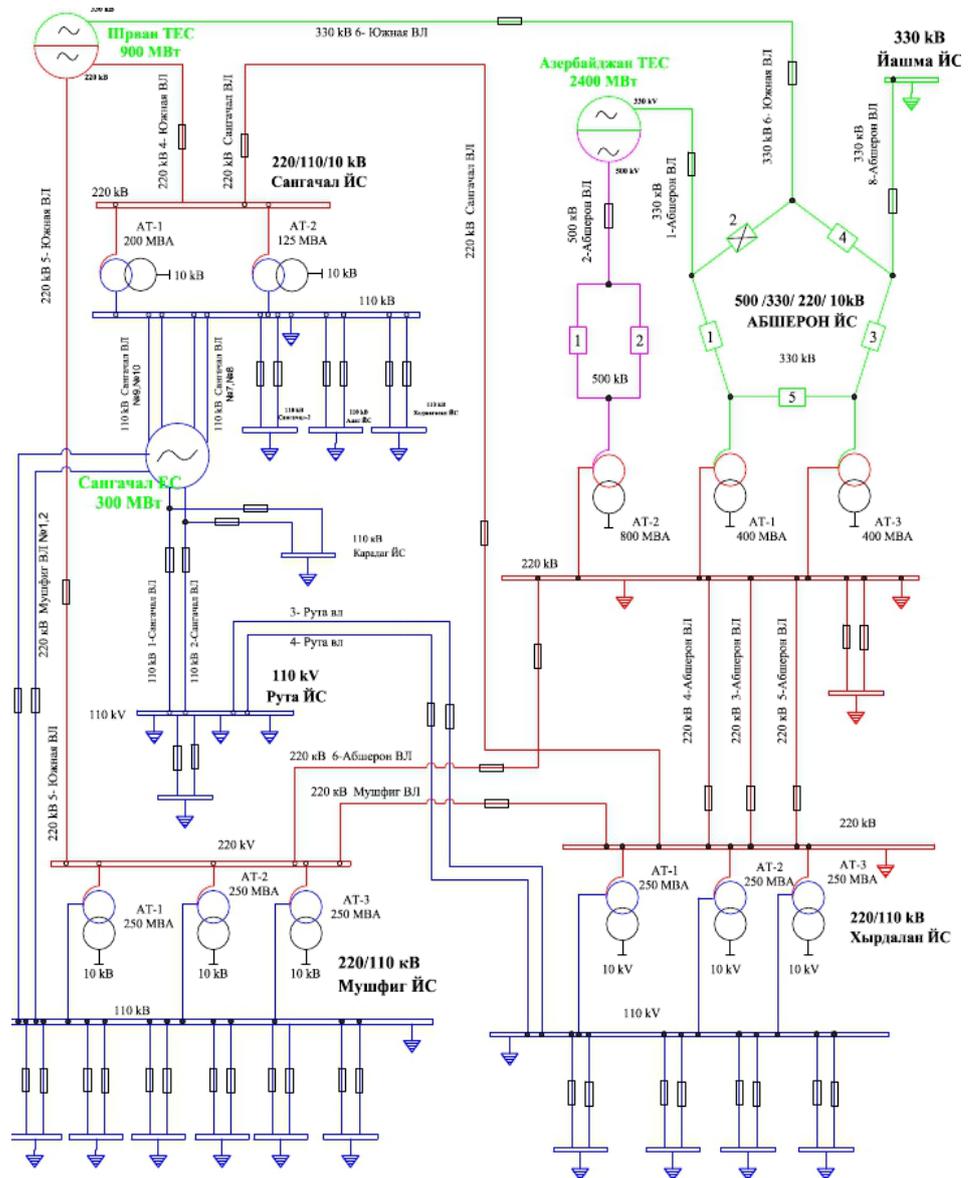


Рис. 2. Упрощенная однолинейная схема исследуемой сети

Fig. 2. Simplified linear scheme of tested network

Для анализа влияния флуктуаций мощности нагрузки на ВПР в электрической сети в качестве дискретных выборок для флуктуаций принимали данные, полученные на основе реальных замеров и моделированием методом Монте-Карло. Для анализа результатов ВПР в качестве примера брали случайные выборки, получаемые методом Монте-Карло, моделирующие глубину изменчивости нагрузки в интервале 5, 12 и 20 % относительно заданных значений среднесуточного графика нагрузки (рис. 1, сплошная кривая). Количество элементов в каждой выборке – 1500 значений мощности нагрузки, для каждой из которых проводили расчеты вероятностного потокораспределения.

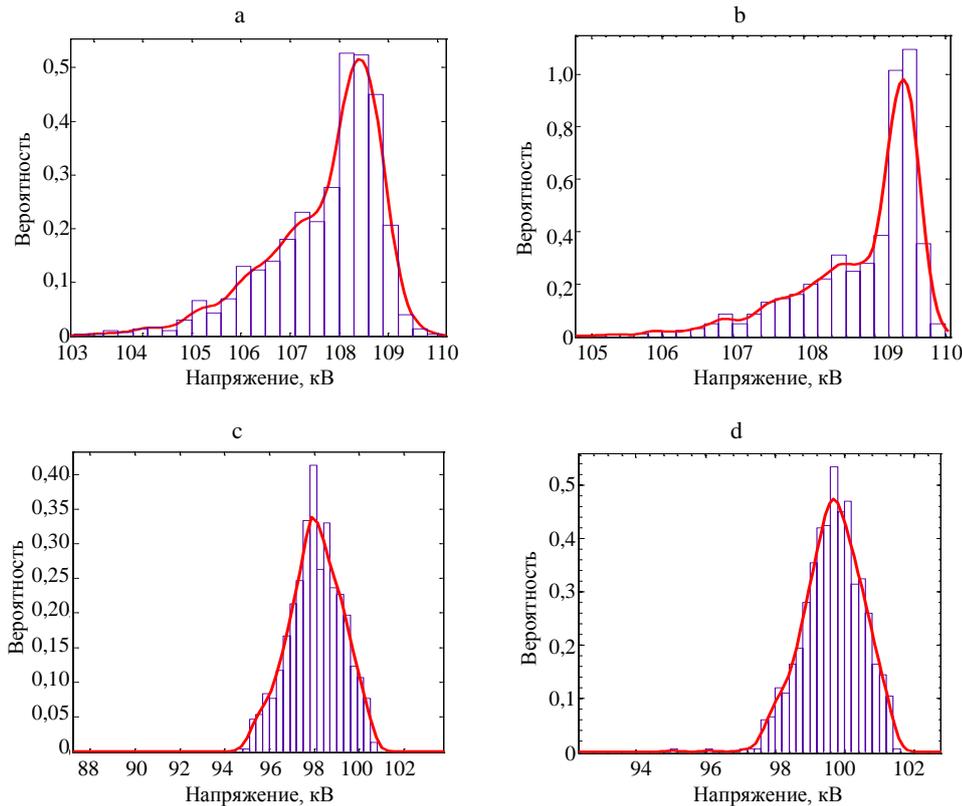


Рис. 3. Функции плотности вероятности напряжения при стохастических колебаниях мощности на уровнях 4 % (а, б) и 20 % (с, д) при расчете: а, с – методом Монте-Карло; б, д – по реальным замерам

Fig. 3. Probability density function of voltage under stochastic power change on the level of load of 4 % (a, b) and 20 % (c, d) calculated by: a, b – Monte-Carlo method; c, d – the actual measurements

Сравнение результатов моделирования показывает, что в интервале 4 % изменения нагрузки отклонения напряжения будут находиться в нормально допустимых пределах с вероятностью 0,9 (рис. 3). При уровне стохастических процессов нагрузки в интервале 20 % могут быть случаи, когда от-

клонения напряжений находятся ниже их предельно допустимых значений, т. е. величина напряжения опускается ниже  $0,9U_n$ .

Анализ режимов в периоды суточного максимума для различных дней показывает, что при флуктуациях нагрузки с уровнем более 10–15 % вероятность появления случаев с отклонением напряжения ниже предельно допустимых достигает более 50–60 %. Для уменьшения диапазона отклонения напряжения за предельно допустимую величину при флуктуациях нагрузки выше 15 % от среднего значения были проведены исследования о возможности компенсации этих отклонений с помощью статических компенсаторов реактивной мощности (SVC).

Функция плотности распределения напряжения в узле Мушвиг с включенными в схему батареями конденсаторов с мощностями, рассчитанными на случаи падения напряжения  $0,9U_n$ , и при уровне стохастических процессов в нагрузке около 20 % от установленной мощности показана на рис. 4. Как видно, величина отклонения напряжения при SVC-узле сохраняется в нормально допустимых пределах с высокой вероятностью.

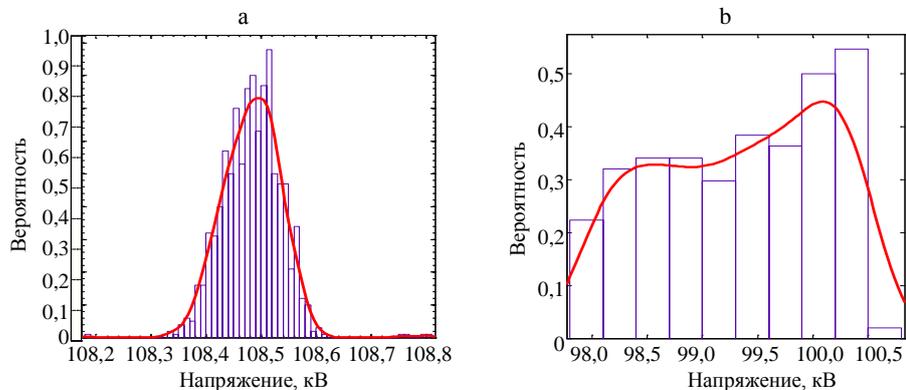


Рис. 4. Функция плотности распределения напряжения в узле п/ст Мушвиг при компенсации реактивной мощности с помощью SVC (a) и отсутствии SVC (b)

Fig. 4. Probability density function of the voltage on the Mushvig substation site under reactive power compensation with the use of SVC (a) and without compensation (b)

## ВЫВОДЫ

1. Для оценивания величины напряжения в электрической системе и соответствия ее нормам международного стандарта EN 50160 важным является оценивание расчетной вероятности указанной величины. Прежде чем получить оценку максимума отклонения напряжения от нормальной заданной величины, необходимо рассчитать вероятность распределения напряжения, а только потом оценивать величину максимума отклонения по стандарту.

2. Анализ вероятностного потокораспределения при стохастическом изменении мощности потребления в узле нагрузки показывает, что с ростом максимума нагрузки может существенно измениться вероятностная

оценка напряжений. Имеются вероятности превышения уровнем напряжения его предельно допустимых значений при учете случайной изменчивости нагрузки в часы суточного максимума.

3. Проведенные расчеты вероятностного потокораспределения показывают, что при компенсации реактивной мощности в узлах нагрузки с наличием вероятности выхода величины напряжения за пределы допустимого установка регулирующего компенсирующего устройства существенно улучшает величину напряжения и позволяет получить его оценку с большей вероятностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Anders, G. J. Probability Concepts in Electric Power Systems / G. J. Anders. N.Y.: Wiley, 1990. 682 p.
2. Управление мощными энергообъединениями / Н. И. Воропай [и др.]; под ред. С. А. Соколова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 256 с.
3. Rahman, S. An Efficient Load Model for Analyzing Demand Side Management Impacts / S. Rahman, R. Rinaldy // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. Vol. 8, No 3. P. 1219–1226.
4. Voltage Stability Problem for GRID with Distribution Generation and Renewable Sources / A. M. Hashimov [et al.] // Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering, ICTPE-2015 (Bucharest, Romania). International Organization on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IOTPE), 2015. P. 159–165.
5. Alvarado, F. Uncertainty in Power System Modeling and Computation / F. Alvarado, Y. Hu, R. Adapa // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1992. Vol. 1. P. 754–760.
6. Zhang, P. Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Graw-Charlier Expansion / P. Zhang, S. T. Lee // IEEE Transactions on Power Systems. 2004. Vol. 19, No 1. P. 676–682.
7. Chen, P. Probabilistic Load Flow: a Review / P. Chen, Z. Chen, B. Bak-Jensen // 3<sup>rd</sup> International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT. China: Computer Society, 2008. P. 1586–1591.
8. Su, C. L. Probabilistic Load Flow Computation Using Point Estimate Method / C. L. Su // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20, No 4. P. 1843–1851.
9. Integration of Stochastic Generation in Power Systems / G. Papaefthymiou [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2006. Vol. 28, № 9. P. 655–667.
10. Study of Power Fluctuation from Dispersed Generations and Loads and its Impact on a Distribution Network Through a Probabilistic Approach / P. Chen [et al.] // 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU, 2007. Barselona, Spain. P. 1–5.
11. Gentle, J. E. Random Number Generation and Monte-Carlo Methods / J. E. Gentle. USA: Springer, 2003. 381 p.
12. Гулиев, Г. Б. Вероятностное моделирование потокораспределения в электрической сети с распределенной генерацией с учетом неопределенности мощностей выработки и потребления / Г. Б. Гулиев, Н. Р. Рахманов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н. И. Воропай, А. Н. Назарычев. СПб.: ИСЭМ СО РАН, 2015. Вып. 65: Надежность либерализованных систем энергетики. С. 511–516.
13. Рахманов, Н. Р. Моделирование процесса выработки мощности ветростанцией при прогнозировании режима покрытия мощности нагрузки в энергосистеме во внутрисуточных циклах / Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев, Ф. Ш. Ибрагимов // Проблемы энергетики. 2015. № 3. С. 3–11.
14. Гусейнов, Ф. Г. Оценка параметров и характеристик энергосистем / Ф. Г. Гусейнов, Н. Р. Рахманов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 152 с.

Поступила 05.04.2016 Подписана в печать 10.06.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

## REFERENCES

1. Anders G. J. (1990) *Probability Concepts in Electric Power Systems*. N.Y., Wiley. 682.
2. Voropai N. I., Ershevich V. V., Luginskii Ia. N., Mamikonians L. G., Semenov V. A., Sovalov S. A. (1984) *Powerful Power Systems Management*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 256 (in Russian).
3. Rahman S., Rinaldy R. (1993) An Efficient Load Model for Analyzing Demand Side Management Impacts. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8 (3), 1219–1226. DOI: 10.1109/59.260874.
4. Hashimov A. M., Rahmanov N. R., Ahmedova S. T., Mustafayev A. A. (2015) Voltage Stability Problem for GRID with Distribution Generation and Renewable Sources. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering, ICTPE-2015 (Bucharest, Romania)*. International Organization on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IOTPE), 159–165.
5. Alvarado F., Hu Y., Adapa R. (1992) Uncertainty in Power System Modeling and Computation. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1, 754–760, DOI: 10.1109/ICSMC.1992.271535.
6. Zhang P., Lee S. T. (2004) Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants and Gram-Charlier Expansion. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (1), 676–682. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.818743.
7. Chen P., Chen Z., Bak-Jensen B. (2008) Probabilistic Load Flow: a Review. *3<sup>rd</sup> International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008*. China Computer Society, 1586–1591. DOI: 10.1109/DRPT.2008.4523658.
8. Su C. L. (2005) Probabilistic Load Flow Computation Using Point Estimate Method, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (4), 1843–1851. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.857921.
9. Papaefthymiou G., Schavemaker P. H., Vander Sluis L., Kling W. L., Kurowicka D., Cooke R. M. (2006) Integration of Stochastic Generation in Power Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 28 (9), 655–667. DOI: 10.1016/j.ijepes.2006.03.004.
10. Chen P., Chen Z., Bak-Jensen B., Villafafila R., Sorensen S. (2007) Study of Power Fluctuation from Dispersed Generations and Loads and its Impact on a Distribution Network Through a Probabilistic Approach. *9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Barselona, Article number 4424113. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424113.
11. Gentle J. E. (2003) *Random Number Generation and Monte-Carlo Methods*. USA: Springer. 381.
12. Guliyev H. B., Rakhmanov N. R. (2015) Probabilistic Modeling of Flow Distribution in the Electric Network with Distributed Generation Capacities Taking into Account the Uncertainty of Development and Consumption. *Methodical Problems of Research the Reliability of Large-Scale Power Systems. Issue 65: Reliability Liberalized Energy Systems*. Sankt-Petersburg, Power Systems Inst, 511–516 (in Russian).
13. Rakhmanov N. R., Guliyev H. B., Ibrahimov F. Sh. (2015) Modeling of the Process of Generating Power by a Wind Power Plant in the Prediction of the Mode of the Load Power Cover in the Power System during Daily Cycles. *Problemi Energetiki [Problems of Energy]*, (3), 3–11 (in Russian).
14. Guseynov F. G., Rahmanov N. R. (1988) *Determining Power System Parameters and Characteristics*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 152 (in Russian).

Received: 4 April 2016    Accepted: 10 June 2016    Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-529-535

УДК 621.313.333

## Две конструкции встраиваемого в асинхронный двигатель электрохимического тормоза

В. В. Соленков<sup>1)</sup>, В. В. Брель<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Значение тормозных устройств возрастает в связи с интенсификацией производства, увеличением движущихся масс, скоростей перемещения и частоты торможений. В течение короткого периода времени тормозные устройства должны преобразовать в тепловую энергию значительное количество механической энергии и передать ее в окружающую среду без снижения работоспособности как устройства, так и машины в целом. Часто для торможения электроприводов применяются нормально замкнутые механические тормоза. При отключении электродвигателя от сети их фрикционные тормозные поверхности замыкаются и препятствуют вращению, а при включении – размыкаются под действием электромагнита, электрогидравлического толкателя, специального электродвигателя, механического или пневматического устройства. В случае совместного выполнения асинхронного двигателя и механического тормоза привод быстрого останова является более компактным и удобным. Такие устройства в дальнейшем будем называть асинхронными двигателями с электрохимическими тормозными устройствами. Многочисленность требований, а также различия условий эксплуатации обуславливают большое разнообразие конструкций этих двигателей. Одними из существенных недостатков работы широко известных конструкций являются периодический износ фрикционных накладок и необходимость их частой замены. Решение данной проблемы – использование асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством. Однако для некоторых производственных механизмов, не требующих плавной остановки и обладающих скоростью вращения вала электродвигателя  $n_{ном} < 1500$  об/мин, более простым и дешевым решением является использование электрохимических тормозных устройств с компенсацией воздушного зазора. Из-за износа фрикционной накладки увеличивается воздушный зазор электромагнита. Данные устройства позволяют за счет компенсации воздушного зазора электромагнита дольше стирать материал фрикционной накладки. Существующие в настоящее время конструкции электрохимического тормозного устройства с компенсацией воздушного зазора достаточно громоздки или сложны в изготовлении. Поэтому авторами статьи разработаны, экспериментально исследованы и внедрены две новые простые и дешевые конструкции электрохимического тормозного устройства с компенсацией воздушного зазора.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, электрохимический тормоз, путь и время торможения, износ, фрикционная накладка, рабочая толщина

**Для цитирования:** Соленков, В. В. Две конструкции встраиваемого в асинхронный двигатель электрохимического тормоза / В. В. Соленков, В. В. Брель // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 529–535

---

### Адрес для переписки

Соленков Виталий Владимирович  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48а, корп. 2,  
246746, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 232 40-18-27  
kaf\_toe@gstu.by

### Address for correspondence

Solencov Vitaliy V.  
P. O. Sukhoi State Technical University  
of Gomel  
48a, housing 2 October Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-18-27  
kaf\_toe@gstu.by

---

## Two Designs of the Electromechanical Brake Embedded into an Asynchronous Motor

V. V. Solencov<sup>1)</sup>, V. V. Brel<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The significance of the braking devices is increasing due to the intensification of manufacturing, increase in the moving masses, speeds of movement and frequency of braking. During a short time period the braking device needs to convert a significant amount of mechanical energy into heat energy and transfer it into the environment without compromising the operability of both devices and machines in general. For electric actuators braking a normally closed mechanical brake is frequently used. When disconnecting the motor from the network the brake friction surfaces are closed and prevent rotation, and when the motor is switched on, they are opens under the action of the electromagnet, electro-hydraulic pusher, special electric motor, mechanical or pneumatic device. In the case of joint implementation of the asynchronous motor and the mechanical brake, the drive of quick stop is more compact and convenient. Such devices are further called asynchronous motors with electromechanical braking systems henceforth. The large number of requirements as well as different conditions of operation cause a large variety of designs of such motors. One of the major shortcomings of the functioning of well-known design is the periodic wear of the friction linings and the need for frequent replacement of them. The solution to this problem is the use of asynchronous motor with recessed combo braking device. However, for some mechanisms that do not require a smooth stop of the motor shaft and that have a speed of rotation of the motor shaft less than 1500 rpm, more simple and cheap solution would be the use of an electromechanical braking device with an air gap compensation. Due to wear of the friction linings the air gap of the electromagnet increases. Due to the compensation of the air gap of the electromagnet these devices make it possible to rub the material of the friction lining longer. The current designs of the electromechanical braking device with compensation of the air gap are quite bulky and complicated to be manufactured. Therefore, the authors developed, experimentally investigated and implemented two new, simple and cheap designs of electromechanical braking device with compensation of the air gap.

**Keywords:** asynchronous motor, electromechanical brake, braking distance and deceleration time, wear friction lining, working thickness

**For citation:** Solencov V. V., Brel V. V. (2016) Two Designs of the Electromechanical Brake Embedded into an Asynchronous Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 529–535 (in Russian)

### Введение

Значение тормозных устройств возрастает в связи с интенсификацией производства, увеличением движущихся масс, скоростей перемещения и частоты торможений. В течение короткого периода времени тормозные устройства должны преобразовать в тепловую энергию значительное количество механической энергии и передать ее в окружающую среду без снижения работоспособности как устройства, так и машины в целом.

Часто для торможения электроприводов применяются нормально замкнутые механические тормоза [1–3]. При отключении электродвигателя от сети их фрикционные тормозные поверхности замыкаются и препятствуют вращению, а при включении – размыкаются под действием электромагнита, электрогидравлического толкателя, специального электродвигателя, механического или пневматического устройства.

Механические тормоза обычно выполняются либо в виде отдельного устройства, устанавливаемого рядом с приводным механизмом, либо объединяются с электродвигателем. Существенный недостаток первого – гро-

моздкость [1]. В случае совместного выполнения асинхронного двигателя и механического тормоза, управляемого с помощью электромагнитного поля базового электродвигателя, специального встроенного электродвигателя или электромагнита, привод быстрого останова является более компактным и удобным [2–4]. Такие устройства в дальнейшем будем называть асинхронными двигателями с электромеханическими тормозными устройствами (АД с ЭМТУ).

### Описание исследования

При рассмотрении особенностей тех или иных типов АД с ЭМТУ, выяснении их преимуществ и недостатков необходимо учитывать многочисленность требований, предъявляемых к электродвигателям с тормозными устройствами. Это следующие требования [3]:

- максимальная унификация с электродвигателями общепромышленного исполнения;
- высокая надежность и долговечность;
- незначительное снижение энергетических показателей и ухудшение пусковых характеристик по сравнению с соответствующими показателями и характеристиками базовых электродвигателей;
- большая допустимая частота включений в единицу времени;
- максимальная простота, минимальные габариты, масса и стоимость тормозного устройства;
- минимальная потребность в дополнительном электрическом оборудовании;
- плавность торможения при высоком тормозном моменте;
- быстрое замыкание и размыкание тормозного устройства;
- тормозная система должна обеспечивать работу электродвигателя в любом положении, а также допускать возможность растормаживания не только электрическим, но и механическим способом;
- должны быть предусмотрены регулировка величины тормозного момента и автоматическая компенсация износа фрикционных тормозных накладок.

Множество этих требований, а также различия условий эксплуатации обуславливают разнообразие конструкций АД с ЭМТУ. Рассмотрим известную конструкцию, представленную на рис. 1 [3–5].

После включения в сеть одновременно с обмоткой электродвигателя под напряжением оказывается и катушка 1 электромагнита. Создаваемый ею магнитный поток замыкается через якорь 2 и притягивает его к сердечнику 3, освобождая тормозной диск-вентилятор 4. При отключении от сети катушка электромагнита обесточивается, а якорь под действием пружины 5 прижимается к тормозному диску, осуществляя торможение электродвигателя.

Одними из существенных недостатков работы описанного электромеханического тормоза являются периодический износ фрикционных накладок и необходимость их частой замены [1–3]. Решение данной проблемы – использование асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ) [6, 7]. Функциональная схема АД с ВКТУ представлена на рис. 2.

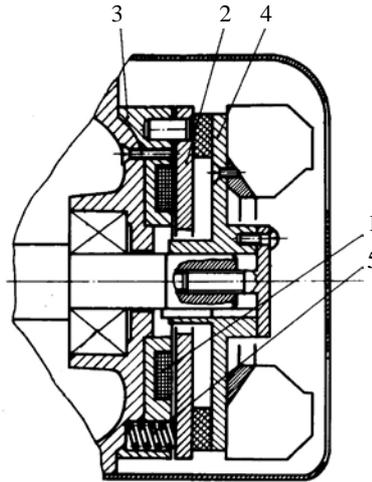


Рис. 1. Электродвигатель со встроенным электромагнитом  
 Fig. 1. The electric motor with a built-in electromagnet

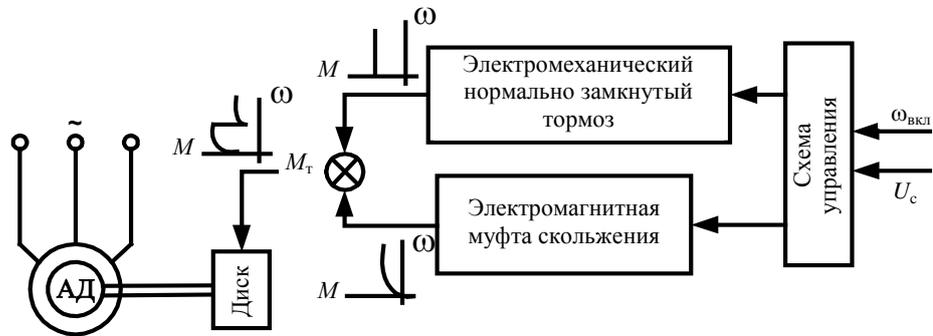


Рис. 2. Функциональная схема асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством  
 Fig. 2. Functional diagram of an asynchronous motor with an embedded combined braking device

АД с ВКТУ содержит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, электромеханический нормально замкнутый тормоз, электромагнитную муфту скольжения и схему управления. Формирование тормозной механической характеристики происходит следующим образом. После отключения двигателя от сети форсирующее напряжение подается на электромагнитную муфту скольжения. Двигатель начинает тормозиться электромагнитным полем, создаваемым вихревыми токами в тормозном диске, который жестко связан с валом двигателя. Чем больше скорость вращения вала двигателя, тем больший тормозной момент создает электромагнитная муфта. В процессе торможения скорость вала замедляется, и при достижении заданной скорости включения  $\omega_{вкл}$  схема управления размыкает электромеханический тормоз. С этого момента на вал двигателя действует суммарный тормозной момент от муфты и от электромеханического тормоза. Скорость включения  $\omega_{вкл}$  определяется необходимой тормозной механической характеристикой электропривода и задается изначально в схеме управления.

К достоинствам предложенной конструкции АД с ВКТУ относятся:

- малый износ фрикционных накладок тормоза за счет того, что механическое торможение происходит на пониженной скорости. Допустимое число торможений обратно пропорционально квадрату изменения частоты вращения ротора в начале торможения [1], т. е. если частоту вращения ротора в начале торможения для электромеханического тормоза уменьшить в два раза ( $\omega_{\text{вкл}} = 0,5\omega_{\text{н}}$ ), то допустимое число торможений для фрикционной накладки увеличится в четыре раза;

- плавность торможения за счет использования электромагнитной муфты скольжения, обладающей мягкой тормозной характеристикой;

- возможность встраивания в базовый асинхронный двигатель (со стороны вентилятора).

Однако, несмотря на перечисленные достоинства конструкции АД с ВКТУ, для некоторых производственных механизмов, не требующих плавной остановки и обладающих скоростью вращения вала АД  $n_{\text{ном}} < 1500$  об/мин (тормозной момент электромагнитной муфты при небольшой скорости вращения мал), более простым и дешевым решением является использование электромеханических тормозных устройств с компенсацией воздушного зазора. Из-за износа фрикционной накладки увеличивается воздушный зазор электромагнита. Данные устройства позволяют за счет компенсации воздушного зазора электромагнита дольше стирать материал фрикционной накладки.

Существующие в настоящее время конструкции электромеханического тормозного устройства с компенсацией воздушного зазора достаточно громоздки или сложны в изготовлении [2, 8–10]. Поэтому авторами статьи разработаны, экспериментально исследованы и внедрены две новые простые и дешевые конструкции электромеханического тормозного устройства с компенсацией воздушного зазора. Конструкция, использующая увеличенный ход якоря при рядном расположении электромагнитов, представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, увеличенный ход якоря получается за счет того, что якорем первого электромагнита (первый со стороны подшипникового щита электродвигателя) является сердечник второго. Поэтому общий воздушный зазор состоит из суммы двух воздушных зазоров, образованных электромагнитами. Внедрение конструкции позволило на электродвигателе АИР80 уве-

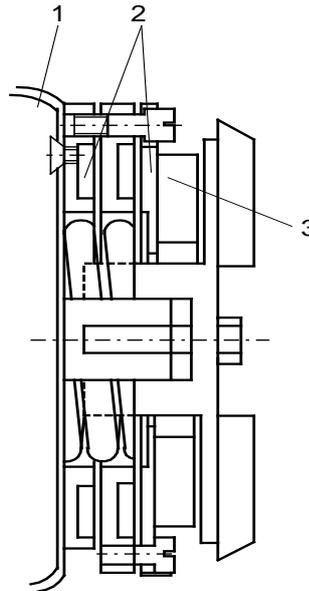


Рис. 3. Встраиваемый электромеханический тормоз с увеличенным ходом якоря:

- 1 – электродвигатель;
- 2 – электромагнит;
- 3 – фрикционная накладка

Fig. 3. An embedded electromechanical brake with an increased stroke of the armature: 1 – motor; 2 – electromagnet; 3 – friction lining

личить рабочую толщину фрикционной накладки с 2 до 4 мм, что продлило долговечность бесперебойной работы электродвигателя в два раза.

Конструкция и ее фотография, в которой компенсация воздушного зазора из-за износа фрикционных накладок осуществляется за счет использования клиновых передач, сдвигающих тормозной диск в сторону уменьшения зазора между фрикционной накладкой и тормозным диском (что соответственно уменьшает воздушный рабочий зазор электромагнита до заданного значения), представлена на рис. 4. Внедрение конструкции на Добрушской бумажной фабрике «Герой труда» также позволило на электродвигателе АИР100 увеличить рабочую толщину фрикционной накладки с 2 до 4 мм и продлить долговечность бесперебойной работы электродвигателя в два раза.

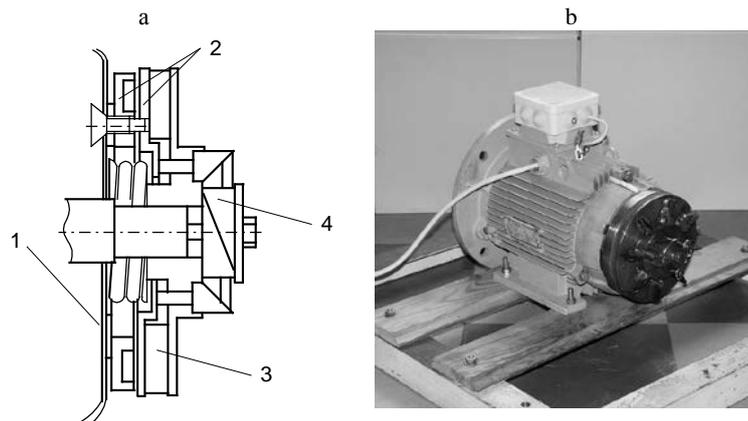


Рис. 4. Конструкция встраиваемого электромеханического тормоза с компенсацией воздушного зазора за счет использования клиновых передач: 1 – электродвигатель; 2 – электромагнит; 3 – фрикционная накладка; 4 – клиновая передача (а) и ее фотография (б)

Fig. 4. The design of the electromechanical brake with a compensation gap by means of the use of the wedge transmission: 1 – motor; 2 – electromagnet; 3 – friction lining; 4 – wedge transmission (a) and its photo (b)

## ВЫВОД

Экспериментальные исследования приведенных конструкций показали, что для производственных механизмов, не требующих плавной остановки и обладающих скоростью вращения вала асинхронного двигателя  $n_{\text{ном}} < 1500$  об/мин, наиболее простым и дешевым решением для торможения асинхронного двигателя является использование разработанных электромеханических тормозов с компенсацией воздушного зазора, позволяющих существенно продлевать долговечность работы встраиваемого электромеханического тормоза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, М. П. Тормозные устройства / М. П. Александров, А. Г. Лысяков. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.
2. Молчанов, Ю. М. Электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом / Ю. М. Молчанов. М.: Информэлектро, 1969. 61 с.
3. Гусельников, Э. М. Самотормозящиеся электродвигатели / Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. М.: Энергия, 1971. 96 с.

4. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2015. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 16.10.2015.
5. Соленков, В. В. Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 4. С. 28–32.
6. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 6. С. 20–24.
7. Соленков, В. В. Математическая модель АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 24–31.
8. Karl, E. Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2000. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 01.02.2008.
9. Karl, E. Brinkmann GmbH. COMBISTOP KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2010. № 3. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of access: 01.12.2010.
10. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2014. № 2. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 01.09.2014.

Поступила 14.12.2015 Подписана в печать 22.02.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Aleksandrov M. P., Lysyakov A. G. (1985) *Braking Devices*. Moscow, Mashinostroyeniye. 312 (in Russian).
2. Molchanov Yu. M. (1969) *Electric Motors with Embedded Electromagnet Brake*. Moscow, Informelektro Publ. 61 (in Russian).
3. Guselnikov E. M., Tsukerman B. S. (1971) *Self-Braking Electric Motors*. Moscow, Energiya. 96 (in Russian).
4. Karl E. (2015) Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 16 October 2015).
5. Solencov V. V., Brel V. V. (2004) Asynchronous Motor with Electromechanical Brake Devices. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (4), 28–32 (in Russian).
6. Solencov V. V., Brel V. V. (2011) Asynchronous Electric Motor with Built-in Combined Braking Device Based on Electro-Mechanical Brake and Electro-Magnetic Clutch. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (6), 20–24 (in Russian).
7. Solencov V. V., Brel V. V. (2013) Mathematical Model of Asynchronous Motor with Embedded Combined Braking Device. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (6), 24–31 (in Russian).
8. Karl E. (2000) Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 1 February 2008).
9. Karl E. (2010) Brinkmann GmbH. Combistop KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (3). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 1 December 2010).
10. Karl E. (2014) Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (2). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 1 September 2014).

Received: 14 December 2015 Accepted: 22 February 2016 Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-536-548

УДК 621.313.3

## **Установившиеся режимы и статические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети**

**В. С. Маляр<sup>1)</sup>, А. В. Маляр<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Национальный университет «Львовская политехника» (Львов, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Разработана математическая модель для исследования работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при питании обмотки статора от однофазной сети. Для создания вращающегося магнитного поля одна из фаз питается через конденсатор. Вследствие несимметрии не только переходные процессы, но и установившиеся режимы являются динамическими, поэтому в любой системе координат описываются дифференциальными уравнениями. Их исследование не может быть с достаточной адекватностью осуществлено на основе известных схем замещения и требует использования динамических параметров. В математической модели уравнения состояния контуров статора и ротора составлены в неподвижной трехфазной системе координат. Расчет установившегося режима выполняется путем решения краевой задачи, что дает возможность получить зависимости координат на периоде, не прибегая к расчету переходного процесса. Для этого исходные нелинейные дифференциальные уравнения алгебраизируются путем аппроксимации переменных кубическими сплайнами. Полученная нелинейная система алгебраических уравнений является дискретным аналогом исходной системы дифференциальных уравнений. Ее решение выполняется методом продолжения по параметру. Для расчета статических характеристик как функции некоторой переменной данная система дифференцируется аналитически, а затем интегрируется численным методом по этой переменной. В процессе интегрирования на каждом шаге или через несколько шагов производится уточнение методом Ньютона, что дает возможность осуществить интегрирование методом Эйлера за несколько шагов. Матрицы Якоби в обоих случаях совпадают. Для учета вытеснения тока в стержнях короткозамкнутого ротора каждый стержень вместе с короткозамыкающими кольцами разбивается по высоте на несколько элементов. В результате на роторе получаем несколько короткозамкнутых обмоток, эквивалентирующихся трехфазными обмотками, между которыми существуют магнитные связи.

**Ключевые слова:** трехфазный асинхронный двигатель, однофазное напряжение, конденсатор, статические характеристики, установившийся режим

**Для цитирования:** Маляр, В. С. Установившиеся режимы и статические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети / В. С. Маляр, А. В. Маляр // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 536–548

---

### **Адрес для переписки**

Маляр Василий Сафронович  
Национальный университет «Львовская политехника»  
ул. С. Бандеры, 12,  
79013, г. Львов, Украина  
Тел.: +38 032 258-21-19  
E-mail: svmaryar@polynet.lviv.ua

### **Address for correspondence**

Malyar Vasyly S.  
Lviv Polytechnic National University  
12 S. Bandera str.,  
79013, Lviv, Ukraine  
Tel.: +38 032 258-21-19  
E-mail: svmaryar@polynet.lviv.ua

---

## Established Modes and Static Characteristics of Three-Phase Asynchronous Motor Powered with Single Phase Network

V. S. Malyar<sup>1)</sup>, A. V. Malyar<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**Abstract.** A mathematical model is developed to study the operation of three-phase asynchronous motor with squirrel-cage rotor when the stator winding is powered from a single phase network. To create a rotating magnetic field one of the phases is fed through the capacitor. Due to the asymmetry of power feed not only transients, but the steady-state regimes are dynamic, so they are described by differential equations in any coordinate system. Their study cannot be carried out with sufficient adequacy on the basis of known equivalent circuits and require the use of dynamic parameters. In the mathematical model the state equations of the circuits of the stator and rotor are composed in the stationary three phase coordinate system. Calculation of the established mode is performed by solving the boundary problem that makes it possible to obtain the coordinate dependences over the period, without calculation of the transient process. In order to perform it, the original nonlinear differential equations are algebraized by approximating the variables with the use of cubic splines. The resulting nonlinear system of algebraic equations is a discrete analogue of the initial system of differential equations. It is solved by parameter continuation method. To calculate the static characteristics as a function of a certain variable, the system is analytically differentiated, and then numerically integrated over this variable. In the process of integration, Newton's refinement is performed at each step or at every few steps, making it possible to implement the integration in just a few steps using Euler's method. Jacobi matrices in both cases are the same. To account for the current displacement in the rods of the squirrel-cage rotor, each of them, along with the squirrel-cage rings, is divided in height into several elements. This results in several squirrel-cage rotor windings which are represented by three-phase windings with magnetic coupling between them.

**Keywords:** three-phase asynchronous motor, single-phase voltage, capacitor, static characteristics, established mode

**For citation:** Malyar V. S., Malyar A. V. (2016) Established Modes and Static Characteristics of Three-Phase Asynchronous Motor Powered with Single Phase Network. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 536–548 (in Russian)

### Введение

Трехфазные асинхронные двигатели (АД) в случае обрыва одной из фаз сети могут работать как однофазные с меньшей нагрузкой, однако после остановки не могут быть пущены в ход без принятия дополнительных мер, поскольку обмотки двух оставшихся в работе фаз при однофазном питании создают не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле [1, 2]. В случае питания третьей фазы через последовательно включенные конденсаторы поле становится эллиптическим, и такой двигатель обладает пусковым моментом. Дополнительную обмотку с последовательно включенным конденсатором имеют также однофазные конденсаторные двигатели [3, 4]. Методы исследования АД, в которых для создания фазосдвигающих элементов используются конденсаторы, совершенствовались на протяжении многих лет в соответствии с развитием вычислительных средств и продолжают развиваться [5–11]. Однако многие вопросы расчета и анализа элек-

тромагнитных и электромеханических процессов до сих пор не решены на уровне современных требований к математическому моделированию.

АД с конденсаторами в одной фазе имеют электрическую несимметрию обмоток статора, что усложняет анализ происходящих в них электромагнитных процессов и делает невозможным непосредственное применение методов анализа симметричных асинхронных машин [2]. Качественную картину явлений рабочего процесса в однофазном асинхронном двигателе можно объяснить исходя из теории вращающихся в противоположные стороны магнитных полей [5]. Однако основанные на этой теории методы расчета, в том числе и известный в литературе метод симметричных составляющих [3, 4], имеют теоретическое обоснование только для линейных систем. Поэтому, несмотря на методологическое значение таких методов, результаты расчетов режимов и характеристик с их использованием [6] можно рассматривать лишь как приближенные. Основой большинства методов исследования процессов в АД с конденсаторами в обмотках являются адаптированные до конкретно решаемых задач схемы замещения [7, 8]. Наиболее полно математическое моделирование режимов работы АД при однофазном питании представлено в [8–10] и других публикациях этих авторов.

Для исследования режимов и характеристик АД, питаемых от однофазной сети, необходимо использовать математические модели, в которых учитываются как обусловленная насыщением нелинейность электромагнитных связей между обмотками, так и вытеснение тока в стержнях ротора. Как отмечено в [7, 11], математическое моделирование динамических режимов несимметричных АД требует использования динамических электромагнитных параметров, а учет вытеснения токов в стержнях ротора с достаточной точностью можно осуществить с применением многоконтурных электрических схем [12–15]. Однако использование схем замещения, в которых вытеснение тока в стержнях короткозамкнутого ротора и насыщения магнитопровода учитываются с помощью различных коэффициентов, неприемлемо, поскольку они зависят от динамики процесса и определить их априорно невозможно.

Несмотря на значительное количество исследований, проблему количественного анализа процессов в АД с конденсаторами в обмотках нельзя считать исчерпанной, а вопросы математического моделирования требуют принципиально новых решений, исходя из современного уровня развития вычислительных средств и численных методов анализа.

Целью статьи является разработка метода расчета установившихся режимов трехфазных АД с конденсаторами в одной обмотке с учетом насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в короткозамкнутой обмотке ротора и на его основе алгоритма расчета статических характеристик. Сущность разработанного метода расчета изложим на примере трехфазного АД с короткозамкнутым ротором, обмотки фаз статора которого соединены звездой, а одна фаза питается через включенный последовательно конденсатор емкостью  $C$  (рис. 1).

### Уравнения электрического равновесия

Наиболее полно электромагнитные процессы в АД можно исследовать в трехфазной системе координат, однако в естественных физических осях дифференциальные уравнения (ДУ) содержат периодические взаимные индуктивности. От этих проблем можно избавиться путем перехода к неподвижной трехфазной системе координат [16], в которой обмотка статора остается непреобразованной, а вращающийся ротор заменяется заторможенным. С целью учета вытеснения тока в стержнях и насыщения магнитопровода ротора потоками рассеивания пазовая часть стержней, а также короткозамыкающие кольца разбиваются по высоте на  $k$  слоев (рис. 2). В результате получим на роторе  $k$  короткозамкнутые обмотки, которые преобразуем к трехфазным в соответствии с общепринятой методикой [2]. При этом в математической модели АД рассматриваются следующие неподвижные трехфазные обмотки (рис. 3): статора –  $A, B, C$  и  $k$  обмоток –  $a_l, b_l, c_l$  ( $l = 1, \dots, k$ ) ротора [13–16].

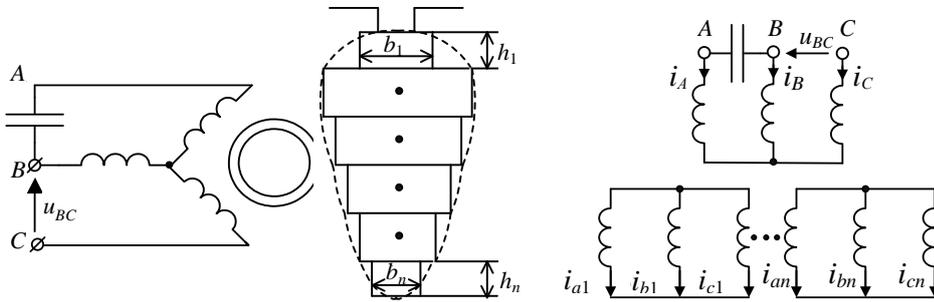


Рис. 1

Fig. 1

Рис. 2

Fig. 2

Рис. 3

Fig. 3

При условии совмещения неподвижных трехфазных осей обмотки ротора с одноименными осями обмотки статора уравнения электрического состояния контуров АД, составленные по законам Кирхгофа с учетом представления обмотки ротора  $k$  трехфазными обмотками, имеют вид [16, 17]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\psi_A - \psi_B) &= -r_A i_A + r_B i_B - u_c; \\ \frac{d}{dt}(\psi_B - \psi_C) &= u_{BC} - r_B i_B + r_C i_C; \\ i_A + i_B + i_C &= 0; \\ \frac{d}{dt}(\psi_{a1} - \psi_{b1}) &= -\alpha(\psi_{b1} - 2\psi_{c1} + \psi_{a1}) - r_1 i_{a1} + r_1 i_{b1}; \\ \frac{d}{dt}(\psi_{b1} - \psi_{c1}) &= -\alpha(\psi_{c1} - 2\psi_{a1} + \psi_{b1}) - r_1 i_{b1} + r_1 i_{c1}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 & i_{a1} + i_{b1} + i_{c1} = 0; \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \frac{d}{dt}(\psi_{ak} - \psi_{bk}) = -\alpha(\psi_{bk} - 2\psi_{ck} + \psi_{ak}) - r_k i_{ak} + r_k i_{bk}; \\
 & \frac{d}{dt}(\psi_{bk} - \psi_{ck}) = -\alpha(\psi_{ck} - 2\psi_{ak} + \psi_{bk}) - r_k i_{bk} + r_k i_{ck}; \\
 & i_{ak} + i_{bk} + i_{ck} = 0; \\
 & \frac{du_c}{dt} = \frac{i_A}{C},
 \end{aligned}$$

где  $u_{BC} = U_m \sin(\omega_0 t - \pi/2)$  – линейное напряжение;  $U_m$  – его амплитуда;  $\omega_0$  – угловая частота напряжения;  $\psi_\zeta, i_\zeta, r_\zeta (\zeta = A, B, C, a_1, b_1, c_1, \dots, a_k, b_k, c_k)$  – потокосцепление, ток и активное сопротивление контуров АД;  $u_c$  – напряжение на конденсаторе;  $\alpha = \omega_0(1-s)/\sqrt{3}$ .

### Расчет установившегося режима при заданном скольжении

С целью сокращения изложения материала систему (1) представим одним векторным ДУ  $m$ -го порядка

$$P \frac{d\bar{y}(\bar{x})}{dt} = \bar{f}(\bar{z}(\bar{y}, \bar{x}), \bar{u}), \tag{2}$$

где

$$\bar{x} = \text{colon}(i_A, i_B, i_C, i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}, \dots, i_{ak}, i_{bk}, i_{ck}, u_c); \quad \bar{u} = \text{colon}(0, u_{BC}, 0, \dots, 0, 0);$$

$$\bar{y} = \text{colon}(\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_{a1}, \psi_{b1}, \psi_{c1}, \dots, \psi_{ak}, \psi_{bk}, \psi_{ck}, u_c); \quad \bar{z} = \Omega \bar{y} + G \bar{x};$$

$$\begin{aligned}
 P = & \begin{bmatrix} E & & & \\ & \ddots & & \\ & & E & \\ & & & 1 \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Omega = \begin{bmatrix} A & & & \\ & B & & \\ & & \ddots & \\ & & & B \\ & & & & 0 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} R & & & -1 \\ & r & & \\ & & \ddots & \\ & & & r \\ 1/C & & & 0 \end{bmatrix}; \\
 A = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha & -2\alpha \\ -2\alpha & \alpha & \alpha \\ & & \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} -r_A & r_B & \\ & -r_B & r_C \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad r = \begin{bmatrix} -r_a & r_b & \\ & -r_b & r_c \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

В установившемся режиме при периодическом возмущении  $\vec{u}(t) = \vec{u}(t+T)$  решением системы ДУ (2) являются  $T$ -периодические зависимости компонент вектора  $\vec{x}(t) = \vec{x}(t+T)$ , определить которые можно методом установления. Однако такой путь решения задачи неприемлем не только с точки зрения объема вычислений и накопления ошибок при интегрировании ДУ, но и проблем, связанных с расчетом статических характеристик, которые являются основой для решения задач оптимизации. Другой путь – получение периодических зависимостей координат путем решения краевой задачи, сущность которого вытекает из общей теории нелинейных колебаний. Для этого необходимо алгебраизировать исходную систему ДУ (2) на сетке узловых точек периода с использованием выбранных базисных функций и краевых условий.

В разработанной математической модели краевая задача решается на сетке  $N$  узловых точек периода  $T$  путем аппроксимации каждой координаты вектора  $\vec{y}$  сплайном третьего порядка [18], который для  $j$ -го участка описывается уравнением вида

$$y(t) = a_j + b_j(t_j - t) + c_j(t_j - t)^2 + d_j(t_j - t)^3, \quad (3)$$

где  $j = \overline{(1, N)}$ ;  $a_j, b_j, c_j, d_j$  – коэффициенты сплайна, соотношения между которыми определяются свойствами сплайн-функций:

$$y(t_j) = y_j = a_j; \quad (4a)$$

$$dy/dt|_{t=t_j} = -b_j. \quad (4б)$$

Исходя из непрерывности сплайна (3) и его двух производных, коэффициенты  $d_j$  можно исключить, а соотношение между остальными коэффициентами определяется уравнениями [18]:

$$b_j = \frac{a_{j-1} - a_j}{h_j} - \frac{h_j}{3}(c_{j-1} + 2c_j); \quad (5a)$$

$$\frac{3}{h_j}a_{j-1} - \left(\frac{3}{h_j} + \frac{3}{h_{j+1}}\right)a_j + \frac{3}{h_{j+1}}a_{j+1} = h_j c_{j-1} + 2(h_j + h_{j+1})c_j + h_{j+1}c_{j+1}, \quad (5б)$$

где  $h_j = t_j - t_{j-1}$  – шаг сетки.

С учетом периодических краевых условий ( $\vec{y}_j = \vec{y}_{N+j}, \vec{x}_j = \vec{x}_{N+j}$ ), образовав векторы  $\vec{A} = \text{colon}(a_1, a_N)$ ,  $\vec{B} = \text{colon}(b_1, b_N)$ ,  $\vec{C} = \text{colon}(c_1, c_N)$ , из уравнений (5) получим систему уравнений  $m$   $N$ -го порядка:

$$H_3 \bar{B} - H_4 \bar{C} = \bar{B}; \quad H_1 \bar{A} - H_2 \bar{C} = 0, \tag{6}$$

в которой в случае равномерного шага ( $h_j = h$ ) соответствующие матрицы имеют вид:

$$\begin{aligned}
 H_1 = \frac{3}{h} \times & \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -2 & 1 & & \dots & & 1 \\ \hline 1 & -2 & 1 & \dots & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & -2 \\ \hline 1 & & & \dots & & 1 \\ \hline \end{array}; & H_2 = h \times & \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 4 & 1 & & \dots & & 1 \\ \hline 1 & 4 & 1 & \dots & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & 4 \\ \hline 1 & & & \dots & & 1 \\ \hline \end{array}; \\
 \\
 H_3 = & \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & & & \dots & & 1 \\ \hline 1 & -1 & & \dots & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & -1 \\ \hline & & & \dots & & 1 \\ \hline \end{array}; & H_4 = h \times & \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & & & \dots & & 1 \\ \hline 1 & 1 & & \dots & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & 1 \\ \hline & & & \dots & & 1 \\ \hline \end{array}.
 \end{aligned}$$

Из (6) с учетом вытекающих из (5) равенств  $\bar{A} = \bar{Y}$ ,  $\bar{B} = -\bar{F}$  получим

$$H\bar{Y} = D\bar{F}, \tag{7}$$

в которой  $\bar{Y} = \text{colon}(\bar{y}_1, \bar{y}_N)$ ;  $\bar{F} = \text{colon}(\bar{f}_1, \bar{f}_N)$ ;  $H = H_4 H_2^{-1} P H_1$ ;  $D = -H_3$ .

Нелинейная система (7) – дискретное отображение нелинейной системы ДУ (2) и аппроксимирует ее на периоде  $T$ . Ее решением является вектор  $\bar{X} = \text{colon}(\bar{x}_1, \bar{x}_N)$ , компоненты которого – это значения вектора  $\bar{x}_j$  (токов контуров и напряжения на конденсаторе) в узлах сетки. Для его получения используется известный в математике дифференциальный метод [19]. Его алгоритм применительно к данной задаче состоит в следующем.

До вектора  $\bar{F}$  входят узловые значения вынуждающих сил – вектор  $\bar{U}$ . Умножим его на скалярный параметр  $\varepsilon$  и представим (7) в виде

$$H\bar{Y} - D\bar{Z} = D\varepsilon\bar{U}. \tag{8}$$

Дифференцируя (8) по  $\varepsilon$ , получим ДУ

$$W \frac{d\bar{X}}{d\varepsilon} = D\bar{U}, \tag{9}$$

где  $W = \left( H - D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{Y}} \right) \frac{\partial \vec{Y}}{\partial \vec{X}} - D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{X}}$  – матрица Якоби, которая является блочно-

диагональной, а блочные элементы определяются значениями параметров АД в  $j$ -й узловой точке:

$$\left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} \right|_j = G; \quad \left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} \right|_j = \Omega;$$

$$\left. \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right|_j =$$

$L_{AA}$	$L_{AB}$	$L_{AC}$	$L_{Aa1}$	$L_{Ab1}$	$L_{Ac1}$	...	$L_{Aak}$	$L_{Abk}$	$L_{Ack}$	
$L_{BA}$	$L_{BB}$	$L_{BC}$	$L_{Ba1}$	$L_{Bb1}$	$L_{Bc1}$	...	$L_{Bak}$	$L_{Bbk}$	$L_{Bck}$	
$L_{CA}$	$L_{CB}$	$L_{CC}$	$L_{Ca1}$	$L_{Cb1}$	$L_{Cc1}$	...	$L_{Cak}$	$L_{Cbk}$	$L_{Cck}$	
$L_{a1A}$	$L_{a1B}$	$L_{a1C}$	$L_{a1a1}$	$L_{a1b1}$	$L_{a1c1}$	...	$L_{a1ak}$	$L_{a1bk}$	$L_{a1ck}$	
$L_{b1A}$	$L_{b1B}$	$L_{b1C}$	$L_{b1a1}$	$L_{b1b1}$	$L_{b1c1}$	...	$L_{b1ak}$	$L_{b1bk}$	$L_{b1ck}$	
$L_{c1A}$	$L_{c1B}$	$L_{c1C}$	$L_{c1a1}$	$L_{c1b1}$	$L_{c1c1}$	...	$L_{c1ak}$	$L_{c1bk}$	$L_{c1ck}$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$L_{akA}$	$L_{akB}$	$L_{akC}$	$L_{aka1}$	$L_{akb1}$	$L_{akc1}$	...	$L_{akak}$	$L_{akbk}$	$L_{akck}$	
$L_{bkA}$	$L_{bkB}$	$L_{bkC}$	$L_{bka1}$	$L_{bkb1}$	$L_{bkc1}$	...	$L_{bkak}$	$L_{bkbk}$	$L_{bkck}$	
$L_{ckA}$	$L_{ckB}$	$L_{ckC}$	$L_{cka1}$	$L_{ckb1}$	$L_{ckc1}$	...	$L_{ckak}$	$L_{ckbk}$	$L_{ckck}$	
						...				1

Это полная матрица собственных и взаимных дифференциальных индуктивностей контуров АД, для определения которых используются нелинейные зависимости рабочего потокоцепления и потокоцеплений рассеивания контуров статора и ротора от токов [17]:

$$\Psi_\mu = \Psi_\mu(i_\mu); \quad \Psi_{\sigma 1} = \Psi_{\sigma 1}(i_1); \quad \Psi_{\sigma 2} = \Psi_{\sigma 2}(i_2),$$

$$\text{где } i_\mu = \sqrt{\frac{2}{3}(i_{\mu A}^2 + i_{\mu B}^2 + i_{\mu C}^2)}; \quad i_1 = \sqrt{\frac{2}{3}(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}; \quad i_2 = \sqrt{\frac{2}{3}(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}.$$

Интегрируя систему ДУ (9) по  $\epsilon$  в пределах от  $\epsilon = 0$  до  $\epsilon = 1$  при заданном скольжении и напряжении питания, получим значение вектора  $\vec{X}$ , которое уточняется методом Ньютона.

В качестве примера на рис. 4 приведены рассчитанные согласно изложенному алгоритму периодические зависимости токов фаз обмотки статора двигателя 4А160М6У3 ( $P = 15$  кВт;  $U = 230$  В;  $I = 29,9$  А;  $p_0 = 2$ ) и различные значения включенной в фазу А емкости ( $C = 375$  мкФ и  $C = 750$  мкФ). Как видно из рис. 4, при увеличении емкости конденсатора может происходить изменение порядка чередования токов фаз, что обусловлено изменением суммарного реактивного сопротивления фазы АД и конденсатора. Это подтверждается расчетом процесса пуска двигателя без нагрузки с различными значениями емкости. Как видно из рис. 5, от величины емкости зависит направление вращения АД при его пуске.

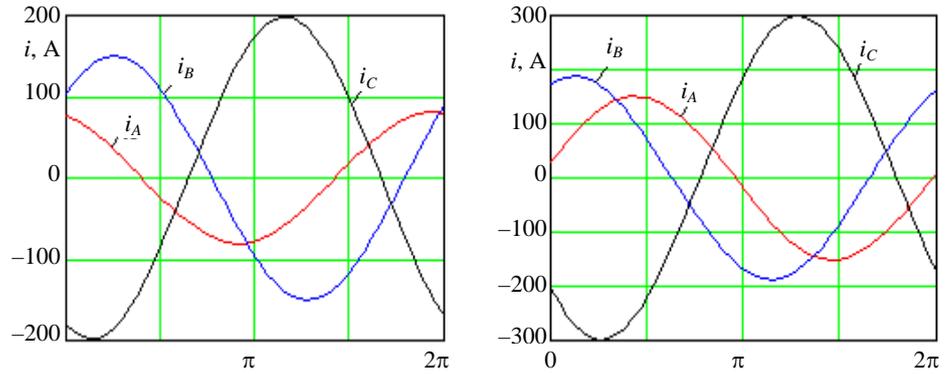


Рис. 4. Кривые изменения токов фаз асинхронного двигателя при  $s = 0,1$  и различных емкостях конденсатора

Fig. 4. Curves of change of phase currents of the asynchronous motor at  $s = 0.1$  and different capacitances of the capacitor

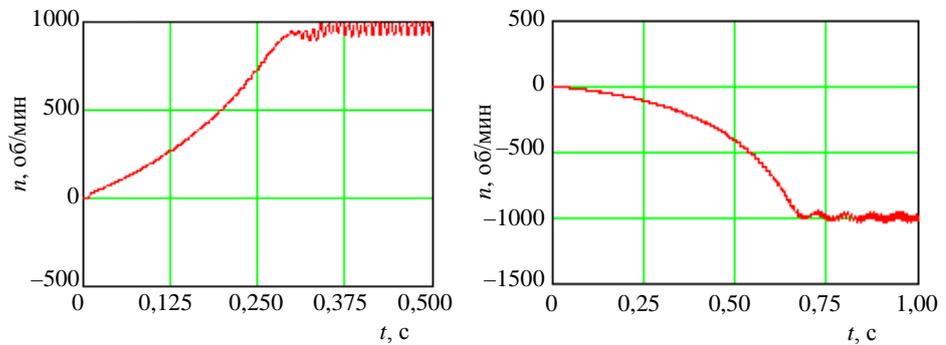


Рис. 5. Зависимости от времени скольжения  $s$  и скорости  $n$  вращения при пуске асинхронного двигателя со значениями емкости  $C$  конденсатора 375 и 750 мкФ

Fig. 5. Dependencies on the time of slip  $s$  and on the speed  $n$  of rotation at start-up of the asynchronous motor with a capacitance  $C$  of the capacitor 375 and 750  $\mu\text{f}$

### Расчет статических характеристик

Система уравнений (7) дает возможность исследовать влияние на режим работы АД изменения любого параметра  $\xi$ , который в нее входит. Для этого необходимо, полагая вектор приложенных напряжений неизменным, проинтегрировать ее по данному параметру. В результате получим

$$W \frac{d\vec{X}}{d\xi} = \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \xi}, \quad (10)$$

интегрируя которую, найдем зависимость компонент вектора  $\vec{X}$  от  $\xi$ , каждый из которых является дискретной периодической зависимостью ко-

ординат, соответствующей определенному значению параметра  $\xi$ . В соответствии с изложенным алгоритмом расчета можно найти все теоретически возможные периодические режимы с целью выбора оптимального. В частности, для расчета пусковой емкости необходимо по изложенному выше алгоритму определить зависимости координат векторов  $\vec{Y}$  и  $\vec{X}$  от емкости конденсатора при заданном скольжении  $s = 1$ , что сводится к расчету зависимости вектора  $\vec{X} = \vec{X}(C)$ , поскольку его компоненты дают возможность рассчитать электромагнитный момент [17]

$$M_e = p_0(\Psi_{\mu A}(i_{\mu B} - i_{\mu C}) + \Psi_{\mu B}(i_{\mu C} - i_{\mu A}) + \Psi_{\mu C}(i_{\mu A} - i_{\mu B}))/\sqrt{3},$$

где  $p_0$  – число пар полюсов АД;  $\Psi_{\mu A}, \Psi_{\mu B}, \Psi_{\mu C}, i_{\mu A}, i_{\mu B}, i_{\mu C}$  – проекция векторов рабочего потокосцепления  $\vec{\psi}_\mu$  и намагничивающего тока  $\vec{i}_\mu$  на оси фаз.

Задача решается путем интегрирования ДУ вида (10), в котором  $\xi = C$ . При этом правая часть уравнения (10) состоит из  $N$  векторов  $\partial \vec{z} / \partial C = D \times (0, \dots, 0, 1/C^2)^*$ . Для расчета механической характеристики  $M = M(s)$  необходимо в (10) заменить  $\xi$  на  $s$ . Таким образом, алгоритм расчета статических характеристик состоит из двух этапов: на первом рассчитывается установившийся режим при заданном значении напряжения, а на втором – собственно необходимая характеристика при неизменном значении напряжения питания.

Примеры результатов расчета зависимостей координат от величины емкости для двигателя 4А160М6У3 показаны на рис. 6.

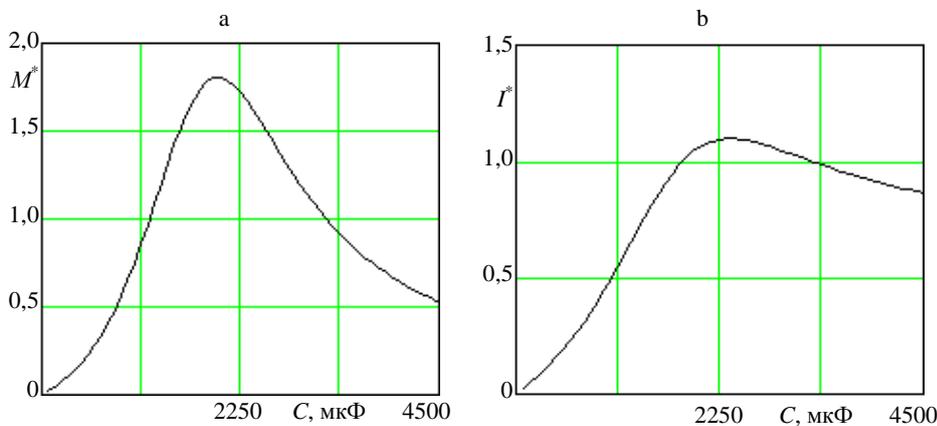


Рис. 6. Зависимости пускового электромагнитного момента (а) и действующего значения пускового тока фазы А (b) от емкости конденсатора

Fig. 6. Dependencies of starting electromagnetic torque (a) and the effective value of the starting current of phase A (b) on the capacitance of the capacitor

## ВЫВОДЫ

Разработаны метод и алгоритм расчета установившихся режимов и статических характеристик трехфазных асинхронных двигателей при питании от однофазной сети. Задача решается как краевая, что не только значительно сокращает объем вычислений по сравнению с методом установления, но и служит основой для выполнения оптимизационных расчетов, в том числе выбора необходимого значения емкости конденсаторов в фазе. Процессы в математической модели асинхронного двигателя рассматриваются в неподвижных трехфазных осях. Для учета насыщения магнитопровода используются реальные характеристики намагничивания основным магнитным потоком и потоками рассеяния, а вытеснение тока в стержнях ротора учитывается путем разбиения стержней по высоте на несколько слоев. В математической модели асинхронного двигателя используется полная матрица дифференциальных собственных и взаимных индуктивностей контуров обмоток статора и ротора, которая вычисляется как производная вектора потокосцеплений контуров по вектору токов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. М.: Высш. шк., 1990. 528 с.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
3. Меркин, Г. Б. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта / Г. Б. Меркин. М.; Л.: Энергия, 1966. 223 с.
4. Тазов, Г. В. Математическая модель асимметричной асинхронной машины / Г. В. Тазов, В. В. Хрущев // Электричество. 1989. № 1. С. 41–49.
5. Торопцев, Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором / Н. Д. Торопцев. М.: Энергоатомиздат, 1988. 95 с.
6. Мощинский, Ю. А. Математическая модель асинхронного конденсаторного двигателя по методу симметричных составляющих с использованием стандартного программного обеспечения / Ю. А. Мощинский, А. П. Петров // Электричество. 2001. № 7. С. 43–48.
7. Бешта, А. С. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя при несимметричном питании статоров / А. С. Бешта, А. А. Семин // Электромеханические и энергосберегающие системы. 2014. Вып. 2. С. 10–16.
8. Беспалов, В. Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, А. П. Петров // Электричество. 2002. № 8. С. 33–39.
9. Беспалов, В. Я. Динамические показатели трехфазных асинхронных двигателей, включаемых в однофазную сеть / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, А. П. Петров // Электротехника. 2000. № 1. С. 13–19.
10. Шуруб, Ю. В. Математическая модель асинхронного конденсаторного двигателя с тиристорным управлением / Ю. В. Шуруб // Техническая электродинамика. 1999. № 4. С. 52–56.
11. Лесник, В. А. Учет дифференциальных параметров при математическом моделировании несимметричных режимов работы асинхронных генераторов / В. А. Лесник, Ю. В. Шуруб // Техническая электродинамика. 2003. № 1. С. 45–48.
12. Rogers, G. An Induction Motor Model with Deep-Bar Effect and Leakage Inductance Saturation / G. Rogers, D. Beraraghana // Archiv fur Electrotechnik. 1978. Vol. 60, No 4. P. 193–201.

13. Stakhiv, P. Influence of Saturation and Skin Effect on Current Harmonic Spectrum of Asynchronous Motor Powered by Thyristor Voltage Regulator / P. Stakhiv, A. Malyar // Proceedings of the IV<sup>th</sup> International Workshop Computational Problems of Electrical Engineering, Gdynia, Poland, June 1–3, 2005. P. 58–60.
14. Фильц, Р. В. Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока / Р. В. Фильц, Е. А. Онышко, Е. Г. Плахтына // Преобразователи частоты для электропривода. Кишинев: Штиинца, 1979. С. 11–22.
15. Mathematical Modeling of Processes in Asynchronous Motors with Capacitors Connected in Series / V. Malyar [et al.] // 16<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2015). Lviv, 2015. P. 107–109.
16. Копылов, И. П. Об уравнениях асинхронной машины в различных системах координат / И. П. Копылов, Р. В. Фильц, Я. Я. Яворский // Известия вузов СССР. Электромеханика. 1986. № 3. С. 22–33.
17. Фильц, Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р. В. Фильц. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
18. Маляр, В. С. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств / В. С. Маляр, А. В. Маляр // Электронное моделирование. 2005. Т. 27, № 3. С. 39–53.
19. Яковлев, М. Н. К решению систем нелинейных уравнений методом дифференцирования по параметру / М. Н. Яковлев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1964. Т. 4, № 1. С. 146–149.

Поступила 21.03.2016 Подписана в печать 26.05.2016 Опубликовано онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V. S. (1990) *Electrical Machines and Micro-machines*. Moscow, Vyshaya Shkola. 528 (in Russian).
2. Voldek A. I. (1978) *Electrical Machines*. Leningrad, Energiya. 832 (in Russian).
3. Merkin G. B. (1966) *Capacitor Electric Motor for Industry Sector and Transportation*. Moscow. Leningrad, Energiya. 223 (in Russian).
4. Tazov G. V., Khrushev V. V. (1989) Mathematical Model of Asymmetrical Asynchronous Motor. *Elektrichestvo* [Electricity], (1), 41–49 (in Russian).
5. Toroptsev N. D. (1988) *Three-Phase Asynchronous Motor in the Scheme of a Single-Phase Inclusion through the Capacitor*. Moscow, Energoatomizdat. 95 (in Russian).
6. Moshchinskiy Yu. A., Petrov A. P. (2001) Mathematical Model of Asynchronous Capacitor Motor Using Symmetrical Component Method in Standard Software. *Elektrichestvo* [Electricity], (7), 43–48 (in Russian).
7. Beshta A. S., Semin A. A. (2014) Determining Parameters of Equivalent Circuit of Asynchronous Machine with Asymmetrical Single-Phase Power Supply of the Stator. *Elektromekhanicheskie i Energosberigayushchie Sistemy* [Electromechanical and Energy Saving Systems], (2), 10–16 (in Russian).
8. Bespalov V. Ya., Moshchinskiy Yu. A., Petrov A. P. (2002) A Mathematical Model of an Asynchronous Motor in a Generalized Orthogonal System of Coordinates. *Elektrichestvo* [Electricity], (8), 33–39. (in Russian).
9. Bespalov V. Ya., Moshchinskiy Yu. A., Petrov A. P. (2000) Dynamic Indices of Three-Phase Asynchronous Motor with Single-Phase Power Supply. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], (1), 13–19 (in Russian).
10. Shurub Yu. V. (1999) Mathematical Model of Asynchronous Capacitor Motor with Thyristor Control. *Tekhnichna Elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], (4), 52–56 (in Russian).
11. Lesnik V. A., Shurub Yu. V. (2003) Accounting of Differential Parameters of Mathematical Simulation of Asymmetrical Modes of Asynchronous Generators. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], (1), 45–48 (in Russian).

12. Rogers G., Beraraghana D. (1978) An Induction Motor Model with Deep-Bar Effect and Leakage Inductance Saturation. *Arhiv fur Electrotechnik*, 60 (4), 193–201.
13. Stakhiv P., Malyar A. (2005) Influence of Saturation and Skin Effect on Current Harmonic Spectrum of Asynchronous Motor Powered by Thyristor Voltage Regulator. *Proceedings of the IV<sup>th</sup> International Workshop Computational Problems of Electrical Engineering, Gdynia, Poland, June 1–3, 2005*. Gdynia, 58–60.
14. Filts R.V., Onyshko E. A., Plakhtyna E. G. (1979) Algorithm of Designing Transient Processes in Asynchronous Motor Taking Into Account Saturation and Current Displacement. *Frequency Converters for Electric Drive*. Kishinev, Shtiyntsa Publ., 11–22 (in Russian).
15. Malyar V., Hamola O., Maday V., Vasylchyshyn I. (2015) Mathematical Modeling of Processes in Asynchronous Motors with Capacitors Connected in Series. *16<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2015)*. Lviv, 107–109. DOI: 10.1109/CPEE.2015.7333350.
16. Kopylov I. P., Filts R. V., Yavorskyi Ya. Ya. (1986) On Equations of Asynchronous Motor in Various Coordinate Systems. *Izvestiya Vuzov SSSR: Electromekhanika* [Proceedings of the Higher Educational Institutions of the USSR. Electromechanics], (3), 22–33 (in Russian).
17. Filts R. V. (1979) *Mathematical Foundations of the Theory of Electromechanical Transducers*. Kiev, Naukova Dumka. 208 (in Russian).
18. Malyar V. S., Malyar A. V. (2005) Mathematical Simulation of Periodic Modes of Functioning of Electrotechnical Appliances. *Electronoe Modelirovanie* [Electronic Modeling], 27 (3), 39–53 (in Russian).
19. Yakovlev M. N. (1964) Towards the Solution of the Systems of Non-Linear Equations by Means of Differentiating by Parameter. *Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziiki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 4 (1), 146–149 (in Russian).

Received: 21 March 2016

Accepted: 26 May 2016

Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562

УДК 621.32

## Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием

Часть 1

В. Б. Козловская<sup>1)</sup>, В. Н. Калечиц<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Электрические сети наружного освещения формируются с учетом их функционального назначения. Обращается внимание на особенности режима работы линии наружного освещения с двусторонним питанием. Такой режим эксплуатации характерен для магистральных улиц и кольцевых дорог. На примере указанной в статье линии наружного освещения с двусторонним питанием произведен расчет режима. В качестве источников света в примере рассмотрены светильники с дуговыми натриевыми лампами высокого давления, подключенные через электромагнитную пускорегулирующую аппаратуру. Представлена методика расчета режима такой линии, точность определения расчетных параметров зависит от полноты исходных данных. Расчет осуществлен с помощью реализованной в среде MathCad программы. Определены режимные параметры для каждой фазы линии: напряжения в точках схемы, мощности, токи, потери мощности и падение напряжения на всех участках. Расчетные данные можно использовать для различных целей. Определены мощности в двух пунктах питания, на основании которых можно найти расход электроэнергии, зная время работы электрического освещения. Произведена оценка эффективности режима на основании обеспечения необходимого уровня напряжения на светильниках. Активная и реактивная мощности светильника определяются величиной напряжения на зажимах. Мощности светильников, равноудаленных от источника питания, отличаются между собой. Величина напряжения оказывает существенное влияние на показатели электропотребления и эксплуатационные характеристики источников света. С помощью данной программы можно смоделировать линию наружного освещения с двусторонним питанием любой конфигурации и рассчитать различные режимы работы (вечерний, ночной, диммирование и др.).

**Ключевые слова:** наружное освещение, электрические сети, пункт питания, источник света, светильник, моделирование режима, потери напряжения

**Для цитирования:** Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Часть 1 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 549–562

---

### Адрес для переписки

Калечиц Вячеслав Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-52  
epp@bntu.by

### Address for correspondence

Kalechyts Vyacheslav N.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-52  
epp@bntu.by

---

## Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply

### Part 1

V. B. Kozlovskaya<sup>1)</sup>, V. N. Kalechyts<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The electrical outdoor lighting grids are formed with a regard for their functional purpose. The present article draws the attention to the specific features of operation mode of an outdoor lighting line with a bilateral supply. This mode of operation is characteristic for main streets and circular roads. The article presents the method of calculating of the mode of such kind and the calculation itself that has been fulfilled on behalf of the outdoor lighting line with a bilateral supply described in the article. Luminaries with high pressure sodium lamps connected through electromagnetic ballasts were used as sources of light. The accuracy of parameters under calculation depends on the completeness of the source data. The calculations were implemented with the use of a program realized in MathCad. For each line phase the following mode parameters were defined: voltage in the circuit points, power, current, power loss and voltage drop on all segments of the line. The calculated data can be used for various purposes. Power magnitudes were determined for two points of supply and one can determine the power consumption provided that the time of operation of electric lighting is known. Estimation of the efficiency the mode on the basis of ensuring the necessary level of voltage at the luminaires was implemented. Active and reactive power of a luminaire is determined by the voltage at the terminals of the luminaires. Magnitudes of power of luminaires located at different distances from the power source differ from each other. The voltage value has a significant effect on the electricity consumption values and on operating characteristics of a light source. With the use of the abovementioned program a line of outdoor lighting with a bilateral supply of any configuration can be simulated and different operation modes of a grid, viz. evening, night, dimming and other modes can be calculated.

**Keywords:** outdoor lighting, electric grids, point of supply, light source, luminaire, modeling of a mode, voltage losses

**For citation:** Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2016) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 549–562 (in Russian)

### Введение

Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов представляет собой совокупность осветительных установок и систем управления ими для организации утилитарного освещения улиц, дорог, площадей, территорий микрорайонов и т. п., архитектурно-художественного освещения зданий и сооружений, а также световой рекламы. При проектировании наружного освещения необходимо обеспечивать нормативные величины количественных и качественных показателей осветительных установок с учетом установленных предельных отклонений, экономичности, надежности, удобства обслуживания осветительных установок, безопасности обслуживающего персонала и населения, рационального использования электроэнергии [1, 2].

Основными особенностями сетей наружного освещения являются их протяженность, а также значительная единичная мощность источников света. Кроме того, обслуживание таких сетей требует значительно больших затрат, чем сетей внутреннего освещения. Поэтому при формировании сетей наружного освещения особенно важно использовать светотехниче-

ское оборудование, характеристики которого максимально учитывают все предъявляемые к этим сетям требования. Сравнение источников света по критерию энергоэффективности представлено в [3]. В Минске эксплуатацией, текущим содержанием и текущим ремонтом сетей наружного освещения различного функционального назначения, а также световым оформлением города занимается УП «Мингорсвет». По состоянию на 01.10.2015, предприятие обслуживало 95363 светильника наружного освещения улиц, в том числе 786 – с дуговыми ртутными лампами (ДРЛ) высокого давления, 84329 – с дуговыми натриевыми лампами (ДНаТ) высокого давления, 10248 – с люминесцентными лампами. Кроме того, УП «Мингорсвет» обслуживает около 43 тыс. световых установок архитектурного освещения, рекламного и праздничного светового оформления города, из которых основную часть (50,3 %) составляют установки с лампами типа ДРИ (металлогалогенные) и ДНаТ (31,3 %). Имеются также светодиодные светильники (9,1 %), светильники с люминесцентными лампами (7,6 %), с лампами типа ДРЛ (1,2 %), накаливания и галогенными (0,5 %) [4].

Среди источников света, задействованных в наружном освещении г. Минска, подавляющее большинство составляют светильники с лампами типа ДНаТ, подключаемые к одной из фаз через электромагнитный пускорегулирующий аппарат (ЭМПРА) с импульсным зажигающим устройством и индивидуальным компенсирующим конденсатором. Среди таких источников света светильники с лампами мощностью 150 Вт составляют около 30 %, с лампами мощностью 100 Вт приблизительно 23 %, с лампами 250 Вт 19 %, с лампами 70 Вт 19 %, с лампами 400 Вт 9 %.

Распределительные сети наружного освещения выполняются кабельными (в земле или кабельной канализации) или воздушными (с использованием самонесущих изолированных проводов или в обоснованных случаях – неизолированных проводов). Общая протяженность линий освещения в г. Минске 4056,0 км, из них кабельных – 3423,5 км, воздушных – 632,5 км [4].

Распределительные линии в пределах одной линии выполняются одним сечением. Электроснабжение осветительных установок осуществляется через пункты питания. Они могут располагаться в трансформаторных подстанциях (ТП) 10/0,4 кВ или непосредственно на световых опорах, в этом случае расстояние от ТП до пункта питания не должно превышать 200 м. В пунктах питания осуществляются коммутация, управление, контроль и учет электрической энергии.

Установки наружного освещения и устройства управления ими в соответствии с требованиями к обеспечению надежности электроснабжения относят к следующим категориям [2]:

– первой – диспетчерские пункты управления сетями наружного освещения;

– второй – осветительные установки городских транспортных и пешеходных тоннелей, осветительные установки улиц, дорог и площадей категории А в г. Минске, областных центрах, городах-героях. К категории А

относятся магистральные дороги, магистральные улицы общегородского значения;

– третьей – остальные осветительные установки.

Для резервирования распределительных линий, относящихся ко второй категории по надежности, между крайними светильниками соседних участков для магистральных улиц рекомендуется предусматривать резервные кабельные линии (нормально отключаемые переключки) [5].

### Основная часть

Обеспечение второй категории надежности может осуществляться путем двустороннего питания линии наружного освещения. Такой режим эксплуатации характерен для магистральных улиц, кольцевых дорог и т. д. Схемы формируются с учетом обеспечения устойчивой работы всех осветительных установок, подключенных к данной линии наружного освещения, при потере питания со стороны любого из пунктов питания.

Электрический расчет сети наружного освещения имеет свои особенности. Выбор сечения проводников осветительных линий производится по следующим условиям [2]:

– расчетное отклонение напряжения осветительной линии для наиболее удаленного светильника не должно превышать 5,0 % от номинального напряжения сети, для наименее удаленных – 2,5 %;

– по допустимому нагреву (или по допустимой плотности тока).

Также должна быть осуществлена проверка защитного аппарата на отключение тока однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке сети. При известной конфигурации осветительной линии и заданной величине допустимой потери напряжения  $\Delta U$  можно определить сечение проводника, пользуясь приближенной формулой

$$S = \frac{M_{\text{прив}}}{C \Delta U_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{прив}}$  – приведенный момент нагрузки, кВт·м;  $C$  – коэффициент, величина которого зависит от материала проводника и напряжения сети (типа сети);  $\Delta U_{\text{доп}}$  – допустимая потеря напряжения, %.

При расчетах зачастую пользуются такой приближенной формулой по условию допустимой потери напряжения, пренебрегая индуктивным сопротивлением проводов. В наружном освещении при определении расчетной нагрузки коэффициент спроса принимают равным 1 (учитывают потери в пускорегулирующей аппаратуре), а мощности ламп светильников – равными номинальным. На самом деле, мощность, потребляемая лампой, зависит от уровня напряжения на ней. Поскольку линии наружного освещения, как правило, достаточно протяженные, а единичная мощность ламп значительная, то и уровень напряжения на лампе снижается по мере удаленности светильника от источника питания. Соответственно уменьшается

потребляемая мощность, изменяются светотехнические характеристики источника света, например световой поток.

В [6] приведены основные особенности, связанные с расчетом режима работы и определением параметров линии наружного освещения с односторонним питанием. На основе расчетов произведена оценка влияния уровня напряжения в начале линии наружного освещения (пункт питания) на параметры такой сети – мощность, потребляемую электроэнергию, величину светового потока, срок службы ламп.

Произведем расчет режима работы линии наружного освещения с двусторонним питанием, учитывая максимально возможную исходную информацию, для получения точных показателей режима работы. В качестве примера рассмотрим наиболее характерную для наружного освещения г. Минска конфигурацию осветительной линии с двусторонним питанием. К разным ТП 10/0,4 кВ подключены пункты питания, расположенные непосредственно в ТП, поэтому расстоянием между ТП и пунктом питания пренебрегаем.

В осветительной линии задействованы лампы типа ДНаТ мощностью 150 Вт, подключенные через ЭмПРА с импульсным зажигающим устройством (активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА  $P_{\text{ном}} = 170$  Вт) и компенсирующим конденсатором емкостью 20 мкФ (номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,86$ ) в светильнике типа ЖКУ. Удаленность от первого пункта питания до ближайшей опоры 80 м, от второго пункта питания до ближайшей опоры – 50 м. Расстояние между опорами 30 м (что приблизительно соответствует длине используемого кабеля), число опор 30, число светильников на опоре – один. Для питания светильников используется кабель с алюминиевыми жилами сечением 4 мм<sup>2</sup>, проложенный в земле; значение удельного сопротивления  $Z_{\underline{y}} = (7,81 + j0,095)$  м·Ом/м, допустимый ток с учетом четвертой рабочей жилы и при прокладке в земле  $I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 38 = 35,0$  А. Светильники подключены симметрично (к каждой фазе по 10 светильников), распределение светильников между фазами А–В–С–А–В–С.

Пусковой ток лампы  $I_{\text{л.пуск}} = 3,2$  А; полный рабочий ток лампы  $I_{\text{л.ном}} = 1,8$  А; полный ток с учетом компенсации  $I_{\text{ном}} = 0,9$  А. Для упрощения расчетов принимаем, что активная мощность с учетом потерь в ЭмПРА и полный ток с учетом компенсации реактивной мощности изменяются пропорционально зависимостям, представленным в [7].

Значения фазных напряжений в двух пунктах питания принимаем равными 230 В. Нагрузка на светильнике (лампа и пускорегулирующий аппарат) определяется по активной мощности и полному току, которые зависят от уровня напряжения на зажимах светильника. Относительные значения потребляемой активной мощности  $P(U)$  и полного тока  $I(U)$  в зависимости от напряжения на зажимах светильника для лампы типа ДНаТ с компенсированным ЭмПРА определяются в соответствии с [7].

Тогда зависимости активной мощности (с учетом потерь в ЭмПРА) и полного тока (с учетом компенсации) светильника с лампой типа ДНаТ с компенсированной ЭмПРА номинальной мощностью 170 Вт от напряжения сети имеют вид, представленный на рис. 1.

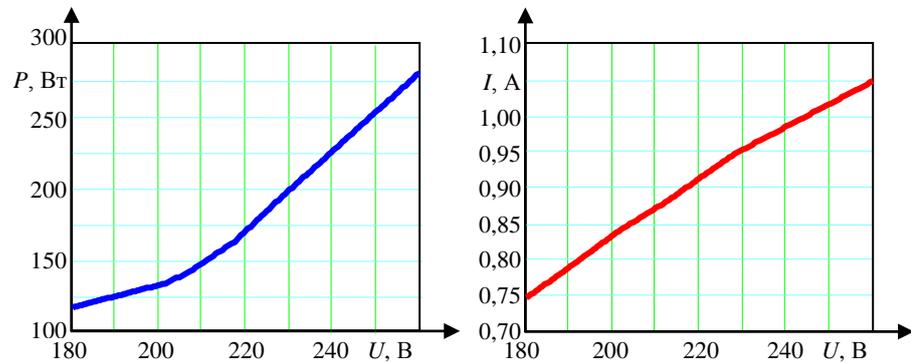


Рис. 1. Зависимости активной мощности  $P(u)$  и полного тока  $I(u)$  светильника номинальной мощностью 170 Вт от напряжения сети

Fig. 1. Dependences of active power (including losses in electromagnetic ballasts)  $P(u)$  and total current (including compensation)  $I(u)$  of luminaire with lamp HPS 170 W on the mains voltage

Расчет режима такой сети наружного освещения осуществляли методом последовательных приближений [8]. В осветительной сети используется глухозаземленная нейтраль в виде системы TN-S (с разделением нулевого проводника на рабочий и защитный). Расчетная схема представлена на рис. 2 (нулевой защитный проводник не показан).

Программа, позволяющая задавать исходные данные сети наружного освещения с двусторонним питанием и рассчитывать ее параметры, реализована в среде MathCad. Для удобства написания программы по расчету режима осветительная линия разделена на число участков, равное числу светильников, поэтому участки для каждой из трех фаз и нулевого рабочего проводника одинаковы независимо от наличия присоединения светильника к рассматриваемой фазе. Расчет режима сети с двусторонним питанием показан на рис. 2 на примере фазы  $A$  (напряжения в первом и втором пунктах питания 230 В). Нахождение параметров для фаз  $B$  и  $C$  аналогично. Обозначения на рис. 2 следующие:  $\underline{U}_{A,П1}$ ,  $\underline{U}_{A,1}$  – комплексное значение напряжения в первом пункте питания (П1) и 1-м узле фазы  $A$  соответственно;  $\underline{S}_{A,П1-1}^H$ ,  $\underline{S}_{A,П1-1}^K$  – то же полной мощности в начале и конце участка [П1–1] фазы  $A$ ;  $\underline{S}_{A,1}^H$  – то же полной мощности светильника, подключенного к фазе  $A$ , имеющего первый порядковый номер (узел 1);  $\Delta \underline{S}_{A,П1-1}$  – то же потерь полной мощности на участке [П1–1] фазы  $A$ ;  $\Delta \underline{U}_{A,П1-1}$ ,  $\Delta \underline{U}_{N,П1-1}$  – падение напряжения на участке [П1–1] фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;  $\underline{I}_{A,П1-1}$ ,  $\underline{I}_{N,П1-1}$  – комплексное значение полных токов на участке [П1–1] фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ ;  $\underline{I}_{л,1}$  – то же полного тока светильника, имеющего первый порядковый номер.

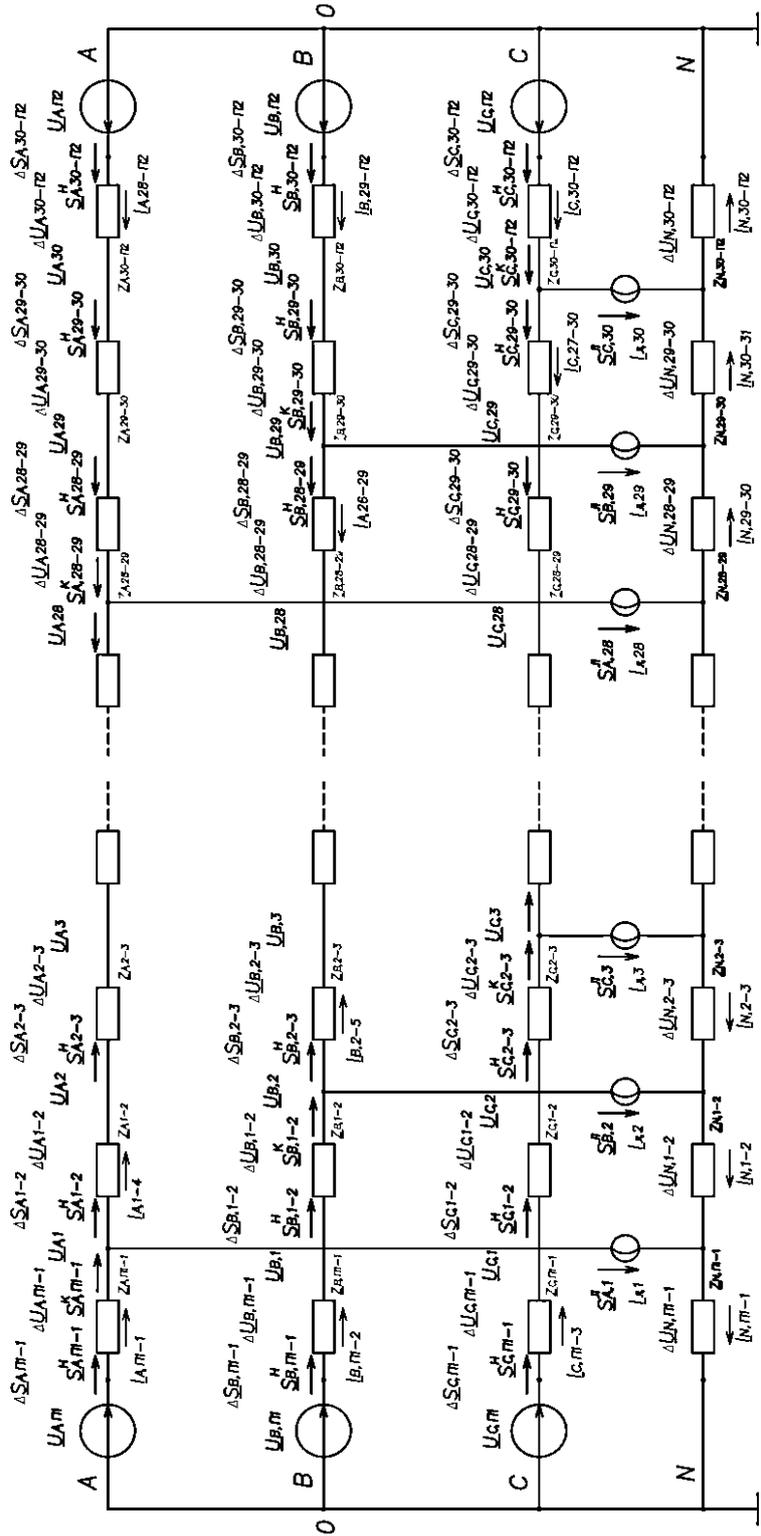


Рис. 2. Расчетная схема сети наружного освещения с двусторонним питанием

Fig. 2. The design scheme of the grid of outdoor lighting with a bilateral supply

Определение параметров осуществляли итерационным путем в такой последовательности. Первоначально задавали значения неизвестных фазных напряжений на зажимах светильников и в остальных точках схемы (рис. 2), например равными фазному напряжению в первом пункте питания (П1), В:

$$\underline{U}_{A,1}^{(0)} = \underline{U}_{A,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{A,30}^{(0)} = \underline{U}_{A,П1}^{(0)} = 230e^{j0};$$

$$\underline{U}_{B,1}^{(0)} = \underline{U}_{B,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{B,30}^{(0)} = \underline{U}_{B,П1}^{(0)} = 230e^{-j120^\circ};$$

$$\underline{U}_{C,1}^{(0)} = \underline{U}_{C,2}^{(0)} = \dots = \underline{U}_{C,30}^{(0)} = \underline{U}_{C,П1}^{(0)} = 230e^{j120^\circ}.$$

Используя правило моментов для токов, можно определить токи головных участков (П1–1) и (30–П2) на основании величин нагрузок в узлах и соотношений сопротивлений отдельных участков сети. Величины токов головных участков (П1–1) и (30–П2) с учетом уравнивающего тока:

$$\underline{I}_{A,(П1-1)}^{(1)} = \sum_{i=1}^M \frac{\underline{I}_{A,i}^{(1)} \underline{Z}_{A,i-П2}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}} + \underline{I}_{A,ур}; \quad (2)$$

$$\underline{I}_{A,(30-П2)}^{(1)} = \sum_{i=1}^M \frac{\underline{I}_{A,i}^{(1)} \underline{Z}_{A,i-П1}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}} - \underline{I}_{A,ур}, \quad (3)$$

где  $\underline{Z}_{A,i-П1}$  – комплексное значение полного сопротивления участка ( $i-П1$ ), индекс (1) – первое приближение;  $A$  – наименование фазы;  $i$  – номер узла;  $\underline{I}_{A,ур}$  – уравнивающий ток, который зависит от разности величин напряжений в пунктах питания (точки П1 и П2) и определяется как

$$\underline{I}_{A,ур} = \frac{\underline{U}_{A,П1}^{(0)} - \underline{U}_{A,П2}^{(0)}}{\underline{Z}_{A,П1-П2}}. \quad (4)$$

Комплексное значение полного тока светильника в первом приближении

$$\underline{I}_{A,i}^{(1)} = I(U_{A,i}^{(0)}) e^{-j \arccos \left( \frac{P(U_{A,i}^{(0)})}{U_{A,i}^{(0)} \cdot I(U_{A,i}^{(0)})} \right)}, \quad (5)$$

где  $P(U_{A,i}^{(1)})$ ,  $I(U_{A,i}^{(1)})$  – значение потребляемой активной мощности и полного тока, определяемое в соответствии с зависимостями, представленными на рис. 1.

Комплексные значения полных токов на участке (1–2) определяли на основе первого закона Кирхгофа (рис. 2)

$$\underline{I}_{A,1-2}^{(1)} = \underline{I}_{A,П1-1}^{(1)} - \underline{I}_{A,1}^{(1)}. \quad (6)$$

Аналогичным образом рассчитывали значения полных токов на всех участках схемы. По найденным токам определяли значения фазных напря-

жений в узлах при известных напряжениях в пунктах питания. Комплексное значение напряжения в узле 1

$$\underline{U}_{A,1}^{(1)} = \underline{U}_{A,\Pi}^{(1)} - \Delta \underline{U}_{A,N;\Pi-1}^{(1)}. \quad (7)$$

Падение напряжения  $\Delta \underline{U}_{A,N;\Pi-1}^{(1)}$  на участке ( $\Pi-1$ )

$$\Delta \underline{U}_{A,N;\Pi-1}^{(1)} = \underline{I}_{A,\Pi-1}^{(1)} \underline{Z}_{A,\Pi-1} + \underline{I}_{N,\Pi-1}^{(1)} \underline{Z}_{N,\Pi-1}, \quad (8)$$

где  $\underline{Z}_{A,\Pi-1}$ ,  $\underline{Z}_{N,\Pi-1}$  – комплексное значение полных сопротивлений участка для фазы  $A$  и нулевого рабочего проводника  $N$ .

Комплексное значение полных токов в нулевом рабочем проводнике  $N$  на участке ( $\Pi-1$ )

$$\underline{I}_{N,\Pi-1}^{(1)} = \underline{I}_{A,\Pi-1}^{(1)} + \underline{I}_{B,\Pi-1}^{(1)} + \underline{I}_{C,\Pi-1}^{(1)}. \quad (9)$$

После расчета токораспределения для каждого участка и уточнения напряжения в узлах первое приближение (итерация) заканчивается. Для получения более точных значений токораспределения и напряжений производятся повторные расчеты с использованием значений напряжений, полученных из предыдущей итерации (т. е. для второй итерации используются фазные напряжения из первой  $\underline{U}_n^{(1)}$ ).

Расчет повторяли до тех пор, пока разность между модулями напряжений и разность между абсолютными значениями углов (фаз) напряжений  $k$ -го и  $(k+1)$ -го приближений для  $i$ -го узла не превысили допустимых погрешностей:

$$\delta U_i = |U_i^{k+1} - U_i^k| \leq \varepsilon; \quad (10)$$

$$\Delta \delta_i = |\Delta \delta_i^{k+1} - \Delta \delta_i^k| \leq \xi. \quad (11)$$

Принимаем допустимые погрешности по модулю и фазе напряжений соответственно  $\varepsilon = 0,0001$ ;  $\xi = 0,0001$ . После достижения итерационным путем указанной точности рассчитывали другие параметры схемы для всех участков.

Комплексное значение полной мощности светильника

$$\underline{S}_{A,i}^{\Pi} = U_{A,i}^{(k+1)} \cdot I(U_{A,i}^{(k+1)}) e^{j \arccos \left( \frac{P(U_{A,i}^{(k+1)})}{U_{A,i}^{(k+1)} \cdot I(U_{A,i}^{(k+1)})} \right)}, \quad (12)$$

где  $P(U_{A,i}^{(k+1)})$ ,  $I(U_{A,i}^{(k+1)})$  – значение потребляемой активной мощности и полного тока, определяемое в соответствии с зависимостями на рис. 1; индекс  $(k+1)$  – приближение, на котором завершился расчет.

Комплексное значение потерь полной мощности на участке  $((i-1)-i)$

$$\Delta \underline{S}_{A,(i-1)-i} = \left( I_{A,(i-1)-i}^{(k+1)} \right)^2 (R_{A,(i-1)-i} + jX_{A,(i-1)-i}), \quad (13)$$

где  $R_{A,(i-1)-i}$ ,  $X_{A,(i-1)-i}$  – активное и реактивное сопротивление участка;  
 $I_{A,(i-1)-i}^{(k+1)}$  – полный ток участка  $((i-1)-i)$ .

Комплексное значение полной мощности в начале участка  $((i-1)-i)$

$$\underline{S}_{A,(i-1)-i}^{(1)} = \underline{U}_{A,i-1}^{(k+1)} \cdot \underline{I}_{A,(i-1)-i}^{*(k+1)}, \quad (14)$$

где  $\underline{U}_{A,i-1}^{(k+1)}$  – комплексное напряжение в начале участка  $((i-1)-i)$  фазы  $A$ ;  
 $\underline{I}_{A,(i-1)-i}^{*(k+1)}$  – комплексно сопряженное значение тока участка  $((i-1)-i)$  фазы  $A$ .

Результаты расчета рассматриваемого режима работы представлены в табл. 1, 2 (без значений тока в нулевом проводнике). На основании рассчитанных данных ток в нулевом проводнике на всех участках схемы имеет значение  $I_N = 0,5-0,6$  А (без учета высших гармоник). Газоразрядные лампы высокого давления из-за специфики газового разряда являются источниками высших гармоник (в основном три гармоники), поэтому реальная величина тока в нулевом проводнике может быть сопоставимой с током в фазных проводниках [9]. В табл. 1 показаны значения полного тока, потерь мощностей и активной и реактивной мощностей в начале каждого участка (в комплексном виде) для каждой фазы. В табл. 2 отображены значения напряжений в точках схемы сети (рис. 2) и значения активной и реактивной мощностей всех светильников для каждой фазы. Из представленной в таблицах информации видно, что мощности, потребляемые светильниками, разноудаленными от источника питания, существенно отличаются между собой, а также от номинального значения. Объясняется это тем, что потребляемая мощность лампы зависит от уровня напряжения на ней, а уровень напряжения в протяженной сети наружного освещения существенно снижается по мере удаления от источника питания. Кроме того, номинальные параметры выпускаемых ламп установлены для напряжения 220 В, в то время как в соответствии с [10] в системах электроснабжения потребителей переменного тока должно применяться напряжение 230 В. Поэтому светильники, ближайšie к источнику питания, потребляют активную мощность, на 24–26 % превышающую ее номинальное значение.

На основании представленных данных можно рассчитать фактическую потребляемую сетью наружного освещения активную мощность. В пунктах питания (участки (П1–1) и (30–П2)) значения потребляемых активных мощностей соответственно равны:

$$P_{П1\Sigma} = 947,3 + 889,8 + 834,8 = 2671,9 \text{ Вт};$$

$$P_{П2\Sigma} = 889,6 + 946,3 + 1005,3 = 2841,2 \text{ Вт}.$$

Таблица 1

Значения параметров каждого участка линии наружного освещения с двусторонним питанием  
The parameter magnitudes of all parts of the outdoor lighting line with a bilateral supply

Значение величины на участке	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	
$I_A, A$	4,6	3,7	3,7	2,8	2,8	2,8	1,9	1,9	1,9	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	
$I_B, A$	4,4	4,4	3,4	3,4	2,5	2,5	2,5	1,6	1,6	1,6	0,7	0,7	0,7	-0,1	-0,1	
$I_C, A$	4,1	4,1	3,2	3,2	3,2	2,3	2,3	2,3	1,4	1,4	1,4	0,5	0,5	0,5	0,4	
$S_A^H, B \cdot A$	947,3 + +j526,1	746,7 + +j427,4	743,4 + +j427,4	556,0 + +j326,3	554,1 + +j326,3	552,2 + +j326,3	374,2 + +j223,5	373,3 + +j223,5	372,4 + +j223,5	198,6 + +j119,6	198,4 + +j119,6	198,2 + +j119,6	26,6 + +j15,2	26,6 + +j15,2	26,6 + +j15,2	26,6 + +j15,2
$S_B^H, B \cdot A$	889,8 + +j497,0	877,5 + +j496,8	688,1 + +j397,7	682,3 + +j397,7	500,4 + +j296,3	498,8 + +j296,3	497,2 + +j296,3	320,8 + +j193,3	320,1 + +j193,3	319,4 + +j193,3	146,5 + +j89,3	146,4 + +j89,3	146,3 + +j89,3	24,9 - -j15,2	24,9 - -j15,2	24,9 - -j15,2
$S_C^H, B \cdot A$	834,8 + +j466,2	824,0 + +j466,1	632,0 + +j366,3	629,6 + +j366,3	446,2 + +j264,5	444,9 + +j264,5	444,9 + +j264,5	267,8 + +j161,3	267,8 + +j161,3	267,3 + +j161,3	266,8 + +j161,3	94,2 + +j57,2	94,1 + +j57,2	94,1 + +j57,2	94,1 + +j57,2	94,1 + +j57,2
$\Delta S_A, B \cdot A$	13,9 + j0,2	3,3 + j0	3,3 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,2 + j0	0,2 + j0	0,2 + j0	0	0	0	0
$\Delta S_B, B \cdot A$	12,3 + j0,1	4,6 + j0,1	2,9 + j0	2,9 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0				
$\Delta S_C, B \cdot A$	10,8 + j0,1	4,0 + j0,1	2,4 + j0	2,4 + j0	2,4 + j0	1,3 + j0	1,3 + j0	1,3 + j0	0,5 + j0	0,5 + j0	0,5 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0
Значение величины на участке	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	26-27	27-28	28-29	29-30	30-31	
$I_A, A$	-0,7	-0,7	-0,7	-1,6	-1,6	-1,6	-2,5	-2,5	-2,5	-3,4	-3,4	-3,4	-4,4	-4,4	-4,4	
$I_B, A$	-0,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,9	-1,9	-1,9	-2,8	-2,8	-2,8	-3,7	-3,7	-3,7	-4,6	-4,6	
$I_C, A$	-0,4	-0,4	-1,3	-1,3	-1,3	-2,2	-2,2	-2,2	-3,1	-3,1	-3,1	-4,0	-4,0	-4,0	-4,9	
$S_A^H, B \cdot A$	-144,7 - -j89,3	-144,8 - -j89,3	-144,9 - -j89,3	-318,0 - -j193,3	-318,7 - -j193,3	-319,4 - -j193,3	-496,2 - -j296,3	-497,8 - -j296,3	-499,4 - -j296,3	-681,9 - -j397,6	-684,6 - -j397,6	-887,5 - -j397,7	-887,4 - -j496,8	-882,0 - -j496,9	-889,6 - -j497,0	-889,6 - -j497,0
$S_B^H, B \cdot A$	-24,9 - -j115,2	-196,5 - -j119,6	-196,7 - -j119,6	-370,8 - -j223,4	-371,7 - -j223,4	-372,6 - -j223,4	-550,7 - -j326,1	-550,7 - -j326,1	-552,6 - -j326,1	-554,5 - -j326,1	-554,5 - -j326,1	-742,1 - -j427,0	-742,1 - -j427,0	-937,6 - -j525,5	-946,3 - -j525,6	-946,3 - -j525,6
$S_C^H, B \cdot A$	-77,4 - -j47,1	-77,4 - -j47,1	-249,7 - -j151,3	-250,1 - -j151,3	-250,5 - -j151,3	-425,7 - -j254,7	-426,8 - -j254,7	-428,0 - -j254,7	-607,8 - -j356,8	-610,1 - -j356,8	-612,4 - -j356,8	-798,8 - -j457,0	-802,7 - -j457,0	-806,6 - -j457,1	-1005,3 - -j554,6	-1005,3 - -j554,6
$\Delta S_A, B \cdot A$	0,1 + j0	0,1 + j0	0,1 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	0,7 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	1,6 + j0	2,9 + j0	2,9 + j0	2,9 + j0	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1	4,6 + j0,1
$\Delta S_B, B \cdot A$	0	0,2 + j0	0,2 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	0,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	1,9 + j0	3,3 + j0	3,3 + j0					
$\Delta S_C, B \cdot A$	0	0	0,4 + j0	0,4 + j0	0,4 + j0	1,2 + j0	1,2 + j0	1,2 + j0	2,3 + j0	2,3 + j0	2,3 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0	3,9 + j0

**Примечание.** Векторы величин, имеющих отрицательные значения в табл. 1, направлены в сторону второго пункта питания (П2); векторы величин, имеющих положительные значения, направлены в сторону первого пункта питания (П1).

Таблица 2

Значения параметров в узлах линии наружного освещения с двусторонним питанием  
The parameter magnitudes in the nodes of the outdoor lighting line with a bilateral supply

Точка схемы	П1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$U_A, В$	230	227,2	226,6	225,8	225,0	224,5	223,9	223,2	223,0	222,5	222,1	222,0	221,7	221,6	221,6	221,5	
$U_B, В$	230	227,4	226,5	225,9	225,1	224,3	223,9	223,4	222,8	222,6	222,2	221,8	221,7	221,5	221,3	221,5	
$U_C, В$	230	228,0	227,1	226,2	225,6	224,9	224,1	223,8	223,2	222,7	222,5	222,2	221,8	221,8	221,6	221,5	
$S_A^n, В \cdot A$		186,7 + +j98,6	-	-	180,6 + +j101,0	-	-	176,0 + +j102,7	-	-	172,9 + +j103,8	-	-	171,3 + +j104,4	-	-	
$S_B^n, В \cdot A$		-	184,8 + +j99,1	-	-	179,1 + +j101,3	-	-	174,9 + +j102,9	-	-	172,2 + +j104,0	-	-	171,0 + +j104,4	-	
$S_C^n, В \cdot A$		-	-	183,8 + +j99,7	-	-	178,5 + +j101,7	-	-	174,6 + +j103,2	-	-	172,2 + +j104,0	-	-	171,3 + +j104,4	
Точка схемы	П2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	П2
$U_A, В$	221,4	221,7	221,8	221,9	221,9	222,3	222,6	222,9	223,6	224,0	224,5	225,4	226,0	226,7	227,7	228,6	230
$U_B, В$	221,5	221,5	221,8	221,9	222,1	222,1	222,6	222,9	223,3	224,0	224,5	225,0	225,9	226,7	227,4	228,5	230
$U_C, В$	221,7	221,7	221,7	222,1	222,2	222,2	222,4	223,0	223,4	223,7	224,5	225,1	225,6	226,6	227,3	228,1	230
$S_A^n, В \cdot A$	171,1 + +j104,5	-	-	172,4 + +j104,0	-	-	175,2 + +j103,0	-	-	-	179,5 + +j101,3	-	-	185,3 + +j99,0	-	-	-
$S_B^n, В \cdot A$	-	171,2 + +j104,4	-	-	173,0 + +j103,8	-	-	176,2 + +j102,6	-	-	-	180,8 + +j100,8	-	-	187,0 + +j98,4	-	-
$S_C^n, В \cdot A$	-	-	171,9 + +j104,1	-	-	174,0 + +j103,4	-	-	177,5 + +j102,0	-	-	-	182,5 + +j100,1	-	-	189,0 + +j97,4	-

Отличие суммарных нагрузок вызвано различной удаленностью пунктов питания от ближайшей к ним опоры. Полное значение потребляемой сетью активной мощности составит  $P_{\Sigma} = P_{\Pi\Sigma} + P_{\Pi2\Sigma} = 5513$  Вт. Эта же величина, полученная расчетным путем, составит  $P_p = 170 \cdot 30 = 5100$  Вт. Как видно, погрешность 413 Вт, или 8 %, что немало.

Активная и реактивная мощности светильника определяются величиной напряжения на зажимах. Для рассматриваемой линии освещения с двусторонним питанием на основании табл. 2 можно определить светильники с наибольшим отклонением напряжения на их зажимах. Взяв в качестве примера фазу А, светильник в точке 16 будет иметь наименьшее напряжение на зажимах, равное 221,4 В. Отклонение напряжения от номинального значения на этом светильнике составляет 3,7 %; потребляемая им активная мощность 171,1 Вт. Для сравнения, наиболее близкий к первому пункту светильник, подключенный к фазе А, имеет следующие параметры: напряжение 227,2 В (отклонение от номинального 1,2 %); потребляемую активную мощность 186,7 Вт.

### ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что потребляемая мощность лампы зависит от уровня напряжения на ней, а уровень напряжения в протяженной сети наружного освещения существенно снижается по мере удаления от источника питания. Кроме того, номинальные параметры выпускаемых ламп установлены для напряжения 220 В, в то время как в соответствии с [10] в системах электроснабжения потребителей переменного тока должно применяться напряжение 230 В. Поэтому светильники, ближайшие к источнику питания, потребляют активную мощность, на 24–26 % превышающую ее номинальное значение.

2. На основании значений активных мощностей головных участков (П1–1) и (30–П2) для каждой из фаз, зная суточный график включения и отключения сети наружного освещения, можно с наименьшей погрешностью определить расчетное значение расхода электроэнергии сети наружного освещения за определенный период времени.

3. Задаваясь различными напряжениями в пунктах питания, с помощью предложенной программы можно смоделировать различные режимы (в том числе работу в вечернем режиме, переход на ночной режим, переход на диммирование и т. д.), сформировать линию наружного освещения с двусторонним питанием любой конфигурации и оценить эффективность режима на основании обеспечения необходимого уровня напряжения на светильниках, а также определения расхода электроэнергии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. Минск: Техноперспектива, 2011. 543 с.

2. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-287–2013. Минск: Минстройархитектуры, 2013. 19 с.
3. Козловская, В. Б. Энергоэффективные источники света в системе наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергия и Менеджмент. 2014. № 2. С. 8–13.
4. Минский городской исполнительный комитет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minsk.gov.by/ru/org/6072/>. Дата доступа: 10.12.2015.
5. Правила устройства электроустановок: 6-е изд. М.: Госэнергонадзор, 2000. 497 с.
6. Козловская, В. Б. Влияние величины напряжения на режим работы сети наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). 2013. № 3. С. 18–25.
7. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.
8. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 2-е изд. Р-н-Д.: Феникс, 2008. 715 с.
9. Стандартные напряжения: ГОСТ 29322–92. Введ. 01.01.93. М.: Изд-во стандартов, 1992. 9 с.
10. Ключев, С. А. Освещение производственных помещений / С. А. Ключев. М.: Энергия, 1979. 152 с.

Поступила 11.04.2016    Подписана в печать 10.06.2016    Опубликована онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Satsukevich V. N. (2009) *Electric Lighting*. Minsk, Tekhnoperspectiva. 543 (in Russian).
2. ТКП 45-4.04-287–2013. External Lighting of Cities, Townships and Rural Settlements. Design Rules. Minsk, Ministry of Architecture Civil Engineering and Construction of Belarus, 2013. 19 (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2014) Energy Efficient Sources of Light in the System of External Lighting. *Energiya i Menedzhment* [Power and Management], (2), 8–13 (in Russian).
4. Minsk City Executive Committee. Available at: <http://minsk.gov.by/ru/org/6072/>. (Accessed 10 December 2015) (in Russian).
5. *Rules of Arrangement of Electrical Installations*. 6<sup>th</sup> ed. (2000) Moscow: State Energy Supervision. 497 (in Russian).
6. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2013) Influence of Voltage Value on Operational Mode of Outdoor Lighting Grid Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (3), 18–25 (in Russian).
7. Eisenberg Yu. B. ed. (2006) *The Reference Book on Light Engineering*. Moscow, Znak Publ. 972 (in Russian).
8. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2008) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 2<sup>nd</sup> ed. Rostov-on-Don, Fenix. 715 (in Russian).
9. State Standard 29322–92. Standard Voltage. Moscow, Standards Publishing House, 1992. 9 (in Russian).
10. Klyuev S. A. (1979) *Lighting of Industrial Premises*. Moscow, Energiya. 152 (in Russian).

Received: 11 April 2016    Accepted: 10 June 2016    Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-563-572

УДК 681.518

## Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев

Д. И. Зализный<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Резюме.** Существующие системы защиты и диагностики не способны выявлять аномальный нагрев силовых конденсаторов, обусловленный развитием их внутренних неисправностей. В статье предлагается методика, позволяющая на ранней стадии обнаружить такой нагрев. Данная методика содержит аппаратную часть и алгоритмы. Аппаратная часть состоит из микропроцессорного прибора, разработанного автором, измерительных трансформаторов тока и датчиков температуры. Это оборудование необходимо подключить к конденсаторной установке с номинальным напряжением 380 В. В процессе работы прибор осуществляет непрерывное измерение температуры поверхности корпуса каждого конденсатора установки, температуры внешней окружающей среды, напряжений и токов со стороны источника питания. Измеренные величины используются в математической модели тепловых процессов, позволяющей рассчитывать температуру наиболее нагретой точки каждого конденсатора в режиме реального времени. Затем выполняется расчет характеристической разности  $\Delta\theta_1$  между среднесуточными значениями температуры диэлектрика и начальным среднесуточным значением этой температуры за вторые сутки от начала измерений. Если величина  $\Delta\theta_1$  превысит значение абсолютной погрешности моделирования, то формируются диагностические сигналы уровней опасности аномального нагрева: низкий, средний, высокий и очень высокий. Также необходимо выполнять расчет скорости изменения  $\Delta\theta_1$  и учитывать полученные значения при формировании уровней опасности. При низком и среднем уровнях опасности аномального нагрева рекомендуется работа системы диагностирования на визуальный сигнал, при высоком уровне – работа на визуальный и звуковой сигналы, а при очень высоком уровне – на отключение конденсатора от сети. Приведенные алгоритмы разработаны эвристически. Окончательное их формирование возможно только после многолетней эксплуатации предлагаемой системы диагностирования на реальных объектах. Внедрение разработанной системы снизит вероятность внезапного отказа конденсаторных установок и соответственно повысит надежность системы электроснабжения предприятия.

**Ключевые слова:** силовой конденсатор, диагностика, аномальный нагрев, система диагностирования

**Для цитирования:** Зализный, Д. И. Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 563–572

---

### Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48а, корп. 2,  
246746, г. Гомель, Республика Беларусь  
Тел.: +375 232 40-57-64  
kaf\_power@gstu.by

### Address for correspondence

Zalizny Dmitry I.  
P. O. Sukhoi State Technical University  
of Gomel  
48a, housing 2 October Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-57-64  
kaf\_power@gstu.by

---

## The Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors

D. I. Zalizny<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The existing system of protection and diagnostics are not able to detect abnormal heating of the power capacitors caused by its internal malfunction formation. The paper contains a proposal of a technique that enables to detect such heat at its early study. This technique consists of a hardware and an algorithms. The hardware consists of a microprocessor-based instrument developed by the author, of measuring transformers of current and of temperature sensors. This equipment must be connected to the condenser unit with a rated voltage of 380 V. In operation, the device performs continuous measurement of the surface temperature of the casing of each condenser, the temperature of the external environment, voltage and current from the power source. The measured values are used in the mathematical model of thermal processes that enables to calculate the temperature of the hottest point of each capacitor in real-time. Then the calculation of the intrinsic difference  $\Delta\theta_1$  between the average temperature values of the dielectric and the base average value of this temperatures during the second day from the start of the measurements. If the  $\Delta\theta_1$  value exceeds the value of the absolute error of simulation, diagnostic signals of abnormal levels of heating, viz. low, medium, high and very high, are generated. It is also necessary to calculate the rate of change of  $\Delta\theta_1$  and to consider the values obtained in the formation of hazard levels. For the low level and the average level of hazard the operation of diagnostic system with a visual signal is recommended, while for the high level of hazard it is recommended to use both visual and sound signals, and for the very high hazard level the capacitor ought to be turned off from the source. The algorithms have been developed heuristically. The final formation of the algorithms is possible only after the long-term operation of the proposed diagnosis system on real objects. The implementation of the developed system will reduce the probability of sudden failure of capacitor units and, correspondingly, will increase the reliability of power supply system of enterprise.

**Keywords:** power capacitor, diagnosis, abnormal heating, diagnosis system

**For citation:** Zalizny D. I. (2016) The Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 563–572 (in Russian)

### Введение

Силовые конденсаторы имеют три основные области применения в системах электроснабжения: для компенсации реактивной мощности, для высокочастотной связи по воздушным линиям электропередачи и для сглаживания выпрямленного напряжения. Во всех случаях к ним либо приложены высокие напряжения, либо через них протекают высокие токи, что приводит к достаточно существенному их нагреву. Под действием напряжения возникают диэлектрические потери, а под действием токов – потери в электродах и переходных контактах, рассеивающиеся в виде теплоты.

Если конденсатор полностью исправен, то его нагрев можно назвать естественным. Если же возрастают диэлектрические потери, увеличивается сопротивление переходных контактов или засоряется поверхность корпуса, то конденсатор нагревается дополнительно. Такой его нагрев будем называть аномальным. Аномальный нагрев конденсатора развивается медленно, годами, и в какой-то критический момент может привести к быстрому развитию аварийной ситуации.

В статье рассматриваются алгоритмы и устройство, позволяющие на ранней стадии выявлять аномальный нагрев силового конденсатора, обусловленный его медленно развивающимися неисправностями.

### **Состояние проблемы**

Отказы силовых конденсаторов – достаточно часто встречающееся явление. Причины отказов можно разделить на две группы: обусловленные быстро и медленно развивающимися неисправностями. В первом случае конденсаторы отключаются от сети с помощью токовых защит и соответствующих коммутационных аппаратов. Этот процесс происходит, как правило, внезапно и приводит к ущербу на предприятии. Во втором случае имеется возможность своевременного реагирования путем сигнализации и предупреждения обслуживающего персонала о возможном отключении.

В научной литературе и патентных базах мало информации о системах раннего диагностирования силовых конденсаторов. Так, в [1] рассматривается методика диагностирования конденсаторов для преобразователей частоты, основанная на методе эквивалентного сопротивления. Методика не учитывает влияние сопротивлений переходных контактов, а также ухудшение условий охлаждения. В [2] предлагается математическая модель тепловых процессов электролитического конденсатора, в которой используется метод конечных элементов и которая не позволяет рассчитывать температуры конденсатора в реальном времени. Устройство, описываемое в [3], на основе контроля напряжения на отключенных конденсаторах позволяет обнаружить ряды конденсаторной установки, в которых имеются поврежденные конденсаторы, и не способно выявлять развитие повреждений в установке на ранней стадии.

Система, представленная в [4], контролирует параметры окружающей среды возле конденсатора и сигнализирует, если они выходят за допустимый уровень. Анализ состояния самого конденсатора при этом не производится. Устройство [5] способно измерять скорость изменения емкости силового конденсатора, но не осуществляет контроля каких-либо его тепловых параметров. Прибор [6] выполняет функции защиты конденсатора на основе измерения его напряжений и токов. Тепловые параметры не контролируются. В [7] предложено встраивать систему тепловой защиты непосредственно в конденсатор. При этом фиксируются значения максимально допустимых температур, что не позволяет на ранней стадии выявлять развивающиеся неисправности. Устройство [8] осуществляет прогнозирование развития дефектов в электролитических конденсаторах, применяющихся в силовой электронике.

Таким образом, разработка системы, позволяющей в режиме реального времени выявлять аномальный нагрев силового конденсатора, – это актуальная задача.

### **Аппаратная часть системы диагностирования**

Основу аппаратной части предлагаемой системы диагностирования составляет прибор контроля и расчета температур (ПКРТ) электроэнергетического оборудования, разработанный автором в рамках задания № 1.1.22 Госу-

дарственной программы научных исследований в 2015 г. [9]. Прибор реализован на основе современного восьмиразрядного микроконтроллера фирмы Atmel AT90USB1286, имеющего память программ объемом 128 килобайт. Фотографии лицевой панели макета ПКРТ, а также одного из экранов и печатной платы его цифровой части показаны на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид лицевой панели, экрана с измеренным током и платы цифровой части прибора контроля и расчета температур

Fig. 1. Appearance of the front panel, display demonstrating the measured current and the digital board of the device for temperature control and calculation

Прибор имеет двухстрочный дисплей, кнопки передвижения по меню и восемь сигнальных светодиодов: «Питание», «Работа», «Запись в память», «Связь с компьютером», «Аномальный нагрев – 1-й уровень опасности», ..., «Аномальный нагрев – 4-й уровень опасности»; позволяет выполнять измерения напряжений, токов и температур (табл. 1).

Таблица 1

**Основные технические характеристики прибора контроля и расчета температур**  
**Main technical characteristics of the device for temperature control and calculation**

Измеряемая величина	Диапазон	Абсолютная погрешность	Количество каналов
Напряжение постоянное и переменное, В ( <i>true RMS</i> )	0–400	±0,2	3
Ток переменный, А ( <i>true RMS</i> )	0–10	±0,1	3
Температура, °C	0–70	±0,1	6

Программное обеспечение прибора выполняет необходимые расчеты и осуществляет вывод всех измеряемых и основных расчетных величин на дисплей. Принципиальная схема подключения предлагаемой системы диагностирования к конденсаторной установке с номинальным напряжением 380 В приведена на рис. 2.

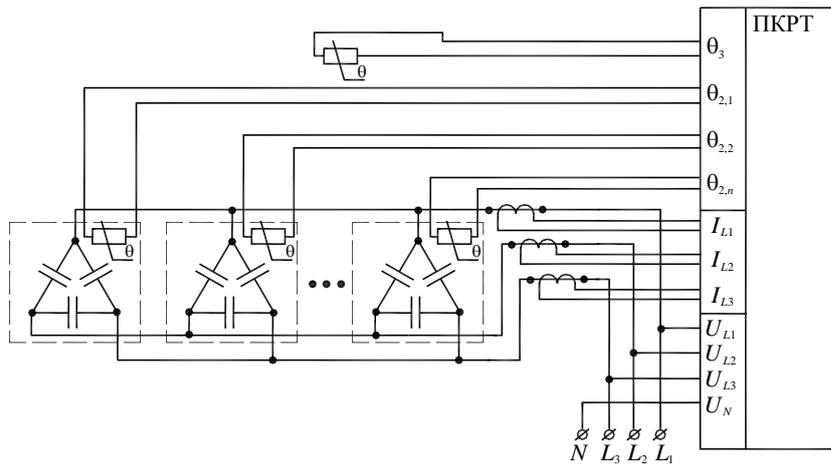


Рис. 2. Схема подключения системы диагностирования силовых конденсаторов

Fig. 2. Wiring system for the diagnosis of power capacitors

К цепям напряжения прибор подключен непосредственно, а к цепям тока – через измерительные трансформаторы. К корпусам конденсаторов прикрепляются датчики температуры. Требуется также датчик для измерения температуры внешней окружающей среды, который, как показывают расчеты [9, с. 141], необходимо установить на расстоянии 10 см от ближайшего конденсатора.

#### Алгоритмы работы системы диагностирования

Для выявления аномального нагрева каждого силового конденсатора необходимо в режиме реального времени выполнять четыре основных этапа:

- измерение требуемых величин (рис. 2);
- расчет потерь активной мощности  $\Delta P$ ;
- расчет температуры наиболее нагретой точки диэлектрика  $\theta_1$ ;
- анализ диагностических параметров.

Поскольку ПКРТ измеряет мгновенные значения фазных напряжений, соответствующие величины линейных напряжений можно получать расчетным путем. На каждом  $k$ -м интервале расчета действующие значения (*true RMS*) линейных напряжений  $U_{1,2}$ ,  $U_{2,3}$ ,  $U_{3,1}$  будут равны:

$$\begin{cases} U_{1,2,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{1,i} - u_{2,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{1,i} - u_{2,i})^2}; \\ U_{2,3,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{2,i} - u_{3,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{2,i} - u_{3,i})^2}; \\ U_{3,1,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{3,i} - u_{1,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{3,i} - u_{1,i})^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i$  – номер интервала измерения;  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  – мгновенные значения фазных напряжений соответствующих фаз;  $T_c$  – период напряжения сети;

$T_d$  – то же дискретизации по каналам тока и напряжения;  $m$  – количество измеренных значений напряжения за период напряжения сети.

Потери активной мощности в конденсаторе определим в соответствии с [10, с. 190]

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_m \approx 0,16\Delta P_d = 0,16 \cdot 2\pi f C_{эл} \operatorname{tg} \delta (U_{1,2}^2 + U_{2,3}^2 + U_{3,1}^2), \quad (2)$$

где  $\Delta P_d$  – потери в диэлектрике;  $\Delta P_m$  – то же в металле электродов;  $f$  – частота напряжения сети;  $C_{эл}$  – электрическая емкость конденсатора;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Для исключения влияния остаточного напряжения на расчет  $\Delta P$  при отключении конденсатора от сети нужно контролировать токи через все его элементы. В случае отсутствия тока в соответствующем элементе расчет  $\Delta P$  должен быть прекращен. Поэтому формулу (2) необходимо дополнить условием наличия соответствующих токов. Для трехфазного конденсатора с внутренними пакетами, соединенными в треугольник, это будут фазные токи  $I_{1,2}$ ,  $I_{2,3}$ ,  $I_{3,1}$ . Непосредственно измерить токи невозможно, поэтому их значения нужно получить расчетным путем на основе измеренных мгновенных значений линейных токов  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  по аналогии с (1) для линейных напряжений.

Логические выражения, дополняющие (2), запишем следующим образом:

$$\begin{cases} (I_{1,2} < I_{\min}) \rightarrow (U_{1,2} = 0); \\ (I_{2,3} < I_{\min}) \rightarrow (U_{2,3} = 0); \\ (I_{3,1} < I_{\min}) \rightarrow (U_{3,1} = 0), \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_{\min}$  – минимальное значение тока через конденсатор при наличии приложенного переменного напряжения.

Значение  $I_{\min}$  можно определить по формуле

$$I_{\min} = U_{\text{ном}} 2\pi f k_{\text{зап}} C_{эл}, \quad (4)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное действующее значение напряжения конденсатора;  $k_{\text{зап}} < 1$  – коэффициент запаса, учитывающий возможное снижение емкости конденсатора и приложенного к нему напряжения (можно принять  $k_{\text{зап}} = 0,5$ ).

В случае группы конденсаторов  $C_{эл}$  – это суммарная емкость, подключенная к контролируемому напряжению. При наличии расчетных значений потерь  $\Delta P$  и измеренных значений температуры поверхности корпуса контролируемого конденсатора  $\theta_2$  и температуры внешней окружающей среды  $\theta_3$  (рис. 2) на основе математической модели тепловых процессов [9] необходимо рассчитывать значения температуры наиболее нагретой точки диэлектрика  $\theta_1$  в соответствии с высотой установки датчика температуры поверхности, т. е. на одной горизонтали с ним.

В качестве диагностических параметров выберем характеристическую разность  $\Delta\theta_1$  и скорость ее изменения  $v_x$ . Параметр  $\Delta\theta_1$  должен быть равен превышению средних значений температуры диэлектрика конденсатора  $\theta_1$  за суточные интервалы над начальным средним значением этой температу-

ры за вторые сутки от начала измерений с учетом погрешности моделирования и позволять выявить наличие аномального нагрева конденсатора. Параметр  $v_x$  должен характеризовать скорость развития неисправности в конденсаторе.

Значения  $\Delta\theta_1$  рассчитаем по алгоритму:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{1,k} = \theta_{1,cp,k} - \theta_{1,cp,2} - \Delta\theta_{max}; \\ \theta_{1,cp,k} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_{1,j,k}; \\ k > 2; \\ n = \frac{24 \cdot 3600}{\Delta t}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k$  – номер суточного интервала;  $\theta_{1,cp,k}$  – среднее значение температуры  $\theta_1$  на  $k$ -м интервале;  $\theta_{1,cp,2}$  – то же на втором суточном интервале после начала измерений;  $\Delta\theta_{max}$  – максимальная абсолютная погрешность расчета температуры  $\theta_1$  по математической модели по отношению к реальным значениям этой температуры;  $\Delta t$  – период дискретизации по каналам температуры;  $j$  – номер интервала измерения и расчета, соответствующий периоду дискретизации  $\Delta t$ ;  $n$  – количество  $j$ -х интервалов за один суточных интервал.

В течение первых суток на расчеты будет действовать ошибка начальных условий математической модели, так как время установления переходных тепловых процессов для среднестатистического силового конденсатора с тепловой постоянной времени  $\tau = 4$  ч составит:  $5\tau = 5 \cdot 4 = 20$  ч. Из этих же соображений выбран суточный интервал для расчета средних значений температуры  $\theta_1$ .

Лабораторные исследования показали, что значение погрешности моделирования  $\Delta\theta_{max}$  находится в пределах  $\pm 4$  °C [9]. Окончательно это значение можно принять только после экспериментальных исследований на работающих конденсаторных установках.

Диагностический параметр  $v_x$ , °C/ч, на  $k$ -м интервале определим по формуле

$$v_{x,k} = \frac{\Delta\theta_{1,k} - \Delta\theta_{1,k-1}}{24}, \quad k > 4. \quad (6)$$

Параметр  $v_x$  равен скорости изменения характеристической разности за один суточный интервал.

Диагностические параметры необходимо сравнивать с их пороговыми значениями для получения уровней опасности аномального нагрева конденсатора. Для характеристической разности  $\Delta\theta_1$  рассмотрим ее переход с отрицательного значения в положительное. Для скорости  $v_x$  выберем порог, обусловленный погрешностью моделирования. Если на  $k$ -м интервале  $v_{x,k} < \frac{\Delta\theta_{max}}{24}$ , то будем считать, что имеет место относительно медленная

скорость развития неисправности в конденсаторе, в противном случае – относительно быстрая скорость развития неисправности.

Используем следующий алгоритм выявления аномального нагрева:

$$\left\{ \begin{array}{l} [(\Delta\theta_{1,k} > 0) \wedge (v_{x,k} > 0)] \rightarrow (G = G + 1); \\ s_k = \frac{G}{m}; \\ A_k = \left[ (s_k > 0,7) \wedge \left( v_{x,k} < \frac{\Delta\theta_{\max}}{24} \right) \right] \vee \left[ (s_k > 0,3) \wedge \left( v_{x,k} \geq \frac{\Delta\theta_{\max}}{24} \right) \right], \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $k$  – номер суточного интервала;  $G$  – счетчик роста суточных интервалов средних значений температуры;  $m$  – общее количество суточных интервалов в процессе анализа аномального нагрева;  $s$  – относительное количество суточных интервалов роста средних значений температуры;  $A$  – булева функция – индикатор наличия аномального нагрева.

Рассмотрим подробнее работу алгоритма (7). Первое логическое уравнение выявляет ситуацию, указывающую на возможность аномального нагрева, когда и характеристическая разность, и ее скорость изменения больше нуля. Если выражение в квадратных скобках равно логической единице, то возможны два варианта: либо произошло естественное увеличение потерь в конденсаторе, обусловленное повышением подаваемого напряжения, либо в конденсаторе развивается неисправность, приводящая к его аномальному нагреву. При любом из этих вариантов счетчик  $G$  инкрементируется.

Параметр  $s$  во втором уравнении показывает относительный вклад возможной ситуации аномального нагрева на временном интервале анализа.

Третье уравнение, записанное в виде булевой функции, присваивает параметру  $A$  логическую единицу, когда наличие аномального нагрева выявлено с высокой степенью вероятности. Выражение в первых квадратных скобках характеризует ситуацию относительно медленно развивающейся неисправности в конденсаторе, когда параметр  $s$  превышает 70 % (более двух третей от всего интервала анализа). Выражение во вторых квадратных скобках указывает на относительно быстро развивающуюся неисправность в конденсаторе, когда значение  $s$  превышает 30 % (условно – около одной трети от всего интервала анализа). В случае, если  $A = 1$ , необходимо определить текущий уровень опасности аномального нагрева конденсатора.

Выделим четыре уровня опасности: низкий, средний, высокий и очень высокий. Присвоим им номера, соответственно:  $w = 1$ ;  $w = 2$ ;  $w = 3$ ;  $w = 4$ . Значение  $w = 0$  показывает отсутствие аномального нагрева. Пороги этих уровней определим на основе характеристической разности  $\Delta\theta_1$  при ее переходе через значения, кратные погрешности  $\Delta\theta_{\max}$ . Такой алгоритм реализуется в виде вложенных условных операторов на любом из языков программирования. Математически запишем его с помощью логических уравнений, размещенных в табл. 2.

В табл. 2 представлены алгоритм, осуществляющий быстрые переходы между уровнями опасности при росте опасности аномального нагрева

конденсатора, и постепенные переходы при снижении опасности. То есть номер уровня опасности скачком может измениться с 0 на 4, но снижаться будет максимум на одно значение каждые сутки. Такая последовательность повышает оперативность реагирования на аварию и снижает вероятность ошибочной недооценки опасности.

При низком и среднем уровнях опасности можно рекомендовать работу системы диагностирования на визуальный сигнал, при высоком уровне – работу на визуальный и звуковой сигналы, а при очень высоком уровне – на отключение конденсатора от сети. В ПКРТ предусмотрена сигнализация уровней опасности аномального нагрева (рис. 1).

Таблица 2

**Алгоритмы для определения уровней опасности аномального нагрева силового конденсатора**

**Algorithms to determine the levels of the risk of the power capacitor abnormal heating**

Условие 1	Условие 2	Результат
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} > 0) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < \Delta\theta_{\max})$ – низкий уровень опасности	$w_{k-1} = 0$	$w_k = 1$
	$w_{k-1} > 1$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq \Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < 2\Delta\theta_{\max})$ – средний уровень опасности	$w_{k-1} < 2$	$w_k = 2$
	$w_{k-1} > 2$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq 2\Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < 3\Delta\theta_{\max})$ – высокий уровень опасности	$w_{k-1} < 3$	$w_k = 3$
	$w_{k-1} > 3$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq 3\Delta\theta_{\max})$ – очень высокий уровень опасности	$w_{k-1} < 4$	$w_k = 4$
$A_k = 0$ – аномальный нагрев отсутствует	$w_{k-1} > 0$	$w_k = w_{k-1} - 1$

Отметим, что приведенные алгоритмы выявления аномального нагрева силового конденсатора разработаны эвристически, т. е. на основе логических рассуждений. Окончательное их формирование возможно только после многолетней эксплуатации предлагаемой системы диагностирования на реальных объектах.

**ВЫВОД**

Предлагаемая система диагностирования может быть применена как с использованием специальных аппаратных средств (прибора контроля и расчета температур электроэнергетического оборудования), так и в составе программного обеспечения существующих систем защиты при наличии в них температурных каналов. Внедрение этой системы снизит вероятность внезапного отказа конденсаторных установок и соответственно повысит надежность системы электроснабжения предприятия.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ma, H. Fault Diagnosis and Failure Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitors in Power Electronic Converters / H. Ma, L. Wang // 31<sup>st</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. IEEE, 2005. 6 p.

2. Parler, S. G. Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal / S. G. Parler, L. L. Macomber // Powersystems World International Conference & Exhibit (PCIM), November 9–11, 1999. Chicago, 1999. 9 p.
  3. Устройство непрерывного контроля состояния силовой конденсаторной батареи: пат. 2103778 РФ: МПК H02H7/16, G01R31/00 / Н. П. Александрова, К. М. Антипов, А. А. Филиппов; дата публ. 27.01.1998.
  4. Intelligent Monitoring System for Capacitor Complete Device: pat. CN 203434604, H02H3/04; H02H7/16 / Fu Shengchun, Shi Juan; date publ.: 02.12.2014.
  5. Device for Capacitor Bank Protection and State Monitoring and Method Thereof: pat. CN 101609977 (A): H02H7/16 / Xiaoxiang Ping, Xiangyu Liu, Changxing Yang; publ. date: 23.12.2009.
  6. Dynamic Self-Adaptive Protection Device of Power Capacitor and Control Method: pat. CN102130443 B: H02H7/16 / Zairong Lin, Xuebao Liu; publ. date: 20.07.2011.
  7. Intelligent Power Capacitor with Overcurrent and Overtemperature Protection: pat. CN 203352146, H02H7/16 / Zhao Jiasong, Wang Guanlin, Hu Guofu; publ. date: 18.12.2013.
  8. Method and Device for Predicting Electrolytic Capacitor Defects, Converter and Uninterruptible Power Supply Equipped with Such a Device: pat. US 8090548 B2: G01R 27/2605, G01R 31/028, G01R 31/40 / A. Karim, R. Christophe, R. Gerard, V. Pascal; publ. date: 03.01.2012.
  9. Разработка методов и средств для раннего диагностирования электродвигателей и силовых конденсаторов по тепловым параметрам: отчет о НИР (заключ.): / Гомельский гос. техн. ун-т имени П. О. Сухого; рук. Д. И. Зализный. Гомель, 2015. 177 с. № ГР 20141241.
  10. Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
- Поступила 02.03.2016    Подписана в печать 27.05.2016    Опубликована онлайн 29.11.2016

## REFERENCES

1. Ma H., Wang L. (2005) Fault Diagnosis and Failure Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitors in Power Electronic Converters. *31<sup>st</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005*. IEEE. 6. DOI: 10.1109/IECON.2005.1569014.
2. Parler S. G., Macomber L. L. (1999) Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal. *Powersystems World International Conference & Exhibit (PCIM), November 9–11, 1999*. Chicago. 9 p.
3. Alexandrova N. P., Antipov K. M., Filippov A. A. (1998) Device for Continuous Monitoring of the State of Power Capacitor Bank. Patent Russian Federation no 2103778 (in Russian).
4. Fu Shengchun, Shi Juan (2014) Intelligent Monitoring System for Capacitor Complete Device: patent CN 203434604.
5. Xiaoxiang Ping, Xiangyu Liu, Changxing Yang (2009) Device for Capacitor Bank Protection and State Monitoring and Method Thereof. Patent CN 101609977 (A).
6. Zairong Lin, Xuebao Liu (2011) Dynamic Self-Adaptive Protection Device of Power Capacitor and Control Method. Patent CN 102130443.
7. Zhao Jiasong, Wang Guanlin, Hu Guofu (2013) Intelligent Power Capacitor with Overcurrent and Overtemperature Protection. Patent CN 203352146.
8. Karim A., Christophe R., Gerard R., Pascal V. (2012) Method and Device for Predicting Electrolytic Capacitor Defects, Converter and Uninterruptible Power Supply Equipped with Such a Device. Patent US 8090548 B2.
9. Zalizny D. I. (2015) *Development of Methods and Tools for Early Diagnosis of Electrical Motors and Power Capacitors According to their Thermal Parameters: a Concluding Report on Research Work*. Number of State Reg. 20141241. Gomel, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. 177 (in Russian).
10. Kuchinsky G. S. (1992) *Electrical Power Capacitors*. Moscow, Energoatomizdat. 320 (in Russian).

Received: 2 March 2016

Accepted: 27 May 2016

Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-573-581

УДК 536.244

## Конвективный теплообмен на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры

Э. Н. Сабуров<sup>1)</sup>, А. Н. Орехов<sup>1)</sup>, Д. А. Онохин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова  
(Архангельск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** В статье приводятся и анализируются результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры, значительно превышающей длину камер в ранее выполненных исследованиях. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществлялся тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами. Вывод газа происходил с противоположного торца. Теплоотдачу конвекцией к закрученному потоку воздуха изучали по методу изменения агрегатного состояния греющего агента – конденсации слегка перегретого водяного пара. Сбор конденсата с рабочего участка производился через гидрозатвор, обеспечивающий поддержание постоянного давления в калориметре. Переданное за время опыта количество теплоты определяли по массе собранного конденсата. Рассмотрены особенности влияния геометрических характеристик камеры на интенсивность теплообмена. В опытах варьировались относительный диаметр выходного отверстия камеры  $\bar{d}_{\text{вых}}$  и относительная площадь входных каналов  $\bar{f}_{\text{вх}}$ . Секционированная конструкция камеры позволяла перемещать калориметр по ее длине. Местный коэффициент теплоотдачи определяли при различных значениях безразмерной продольной координаты  $\bar{z}$ , совпадающей с осью камеры и отсчитываемой от глухого торца закручивателя. Приведены полученные в процессе исследований расчетные уравнения теплоотдачи, которые рекомендуется использовать в инженерной практике. Рассматриваемая задача представляет интерес с точки зрения дальнейшего изучения аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученном потоке циклонных устройств, для совершенствования методик их теплового и аэродинамического расчетов.

**Ключевые слова:** циклонная камера, конвективный теплообмен, коэффициент теплоотдачи, метод конденсации пара, калориметр, число Рейнольдса, число Нуссельта, уравнение теплоотдачи

**Для цитирования:** Сабуров, Э. Н. Конвективный теплообмен на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры / Э. Н. Сабуров, А. Н. Орехов, Д. А. Онохин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 573–581

---

### Адрес для переписки

Сабуров Эдуард Николаевич  
Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М. В. Ломоносова  
наб. Северной Двины, 17,  
163002, г. Архангельск, Российская Федерация  
Тел.: +7 8182 21-61-99  
saburov@narfu.ru

### Address for correspondence

Saburov Eduard N.  
Northern (Arctic) Federal University  
named after M. V. Lomonosov  
17, Severnaya Dvina Emb.,  
163002, Arkhangelsk, Russian Federation  
Tel.: +7 8182 21-61-99  
saburov@narfu.ru

---

## Convective Heat Exchange on the Lateral Surface of a Relatively Long Cyclone Chamber

E. N. Saburov<sup>1)</sup>, A. N. Orehov<sup>1)</sup>, D. A. Onokhin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)

**Abstract.** The high-turbulent swirling flows of heat carrier that are created by a cyclone chamber are used in industry. They make it possible to intensify processes of heat and mass exchange. The results of an experimental study of convective heat transfer on the lateral surface of the active volume of a relatively long cyclone chamber considerably exceeding the length of the chambers that were used in previously performed studies are presented and analyzed in the article. Air supply in the swirler of the chamber was performed tangentially from diametrically opposite sides of the two input channels. The gas outlet was implemented from the opposite end. The heat transfer by convection to the swirling air flow was studied by the method of changing the state of aggregation of a heating agent – condensation of slightly superheated steam. Collecting condensate from the working section was made through a water seal for maintaining a constant pressure calorimeter. The amount of heat transferred during experiment was determined by weight of the collected condensate. The specific features of influence of geometrical characteristics of cyclone chamber on intensity of heat exchange are considered. In the experiments we varied the relative diameter of the outlet port of the chamber  $\bar{d}_{\text{вых}}$  and the relative area of the input channels  $\bar{f}_{\text{вх}}$ . Segmental construction of the chamber made it possible to move a calorimeter on its length. The local heat transfer coefficient was determined for various values of the dimensionless longitudinal coordinate  $\bar{z}$  coinciding with the axis of the chamber, and counted from the back end of the swirler. The estimated equations of heat transfer obtained during the research are presented and recommended for use in practice of engineering. The considered problem is of an interest from the point of view of further research of aerodynamics and of convective heat transfer in a highly swirling flow cyclone devices, in order to improve the methods of their thermal and aerodynamic calculations.

**Keywords:** cyclone chamber, convective heat exchange, heat transfer coefficient, method of steam condensation, calorimeter, Reynolds number, Nusselt number, equation of heat transfer

**For citation:** Saburov E. N., Orehov A. N., Onokhin D. A. (2016) Convective Heat Exchange on the Lateral Surface of a Relatively Long Cyclone Chamber. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 573–581 (in Russian)

Одна из важнейших задач промышленной теплоэнергетики – повышение эффективности и производительности оборудования. Перспективным направлением ее решения является применение высокотурбулентных закрученных потоков теплоносителей, создаваемых в циклонных устройствах. Циклонные камеры нашли широкое распространение в промышленности. Их главные достоинства – простота конструкции и возможность дальнейшей существенной интенсификации рабочих процессов, в первую очередь за счет одной из важнейших составляющих – конвективного теплообмена.

Однако процессы, связанные с использованием закрученного движения теплоносителя в циклонной камере, все еще остаются недостаточно изученными. Большинство исследований по аэродинамике и конвективному теплообмену в циклонных камерах выполнено на их моделях с относительно небольшой длиной. Связано это с тем, что они предназначались для разработки циклонных топок, камер сгорания, печей определенного типа и т. п.

Расширение практического использования циклонных камер для решения различных технологических задач и повышения производительности вызвало необходимость увеличения длины их рабочего объема и проведения соответствующих исследований аэродинамики и конвективного теплообмена. Настоящие исследования авторов – это продолжение и развитие ранее выполненных экспериментов [1–5]. Цель работы – изучение особенностей конвективного теплообмена на боковой поверхности циклонной камеры при различных условиях ввода и вывода потока, обобщение опытных данных и разработка расчетных рекомендаций для практического использования.

Опыты<sup>1</sup> выполнены на экспериментальном стенде (рис. 1), основной элемент которого – секционированная циклонная камера с разносторонним вводом и выводом газов, диаметром рабочего объема  $D_k = 160$  мм и длиной  $L_k = 2040$  мм. Относительная длина камеры  $\bar{L}_k = L_k / D_k = 12,75$  значительно превышала  $\bar{L}_k$  в ранее выполненных исследованиях [6–9]. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами (шлицами) с размерами поперечного сечения  $24 \times 84$  мм. Оси шлицев находились в одной поперечной плоскости на расстоянии  $0,5D_k$  от торцов закручивателя. Относительная высота шлицев  $\bar{h}_{вх} = h_{вх} / D_k = 0,075$ . Безразмерную площадь поперечного сечения входных каналов (площадь входа потока)  $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх} / \pi D_k$  изменяли специально спрофилированными вкладышами. Диаметр выходного отверстия камеры  $\bar{d}_{вых} = d_{вых} / D_k$  изменяли сменными диафрагмами.

Воздух в камеру подавали воздуходувкой номинальной производительностью  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и располагаемым напором  $2,3 \text{ кПа}$ . Изменение расхода воздуха производили регулировочной заслонкой. Расход воздуха измеряли по перепаду давления в сужающем устройстве с помощью дифференциального микроманометра. В качестве сужающего устройства использовали установленную в трубопроводе измерительную диафрагму. Температуру воздуха перед ней и на входе в циклонную камеру измеряли ртутными лабораторными термометрами. Определение избыточного статического давления на подводящем воздуховоде производили через дренажные отверстия  $U$ -образными водяными дифманометрами. Статическое давление во входных каналах и на боковой поверхности камеры измеряли микроманометрами.

Исследование теплоотдачи производили методом парового калориметрирования [9] – конденсации слегка перегретого (на  $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) водяного пара, подаваемого в калориметр (рис. 2). Внутренний диаметр калориметра равен диаметру рабочего объема циклонной камеры (160 мм). Длина рабочего участка калориметра 80 мм. Секционированная конструкция циклонной камеры позволяла менять расположение калориметра по ее длине. Продольную координату  $\bar{z}$  местоположения среднего сечения калориметра

<sup>1</sup> На отдельных этапах работы участие в ней принимала ассистент М. Л. Зайцева.

отсчитывали от глухого торца закручивателя и вдоль оси рабочего объема камеры.

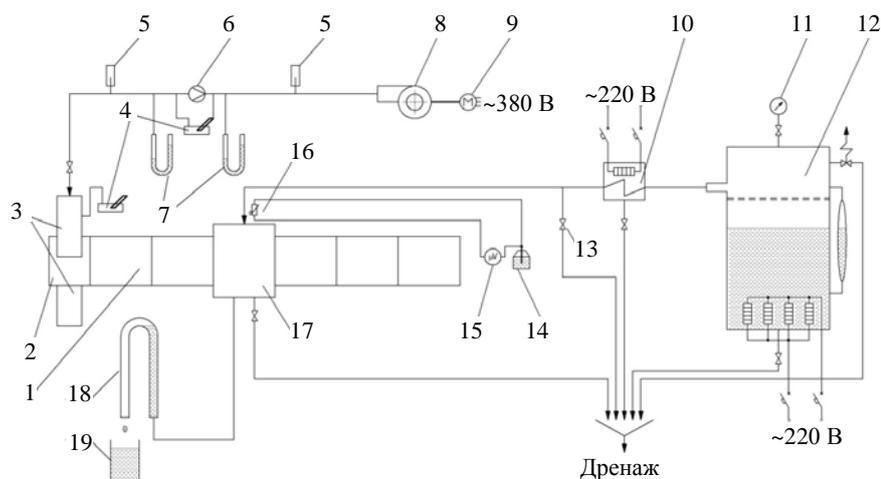


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – циклонная камера; 2 – закручиватель; 3 – входной канал (шлица); 4 – микроманометр;  
 5 – термометр; 6 – сужающее устройство; 7 – U-образный манометр; 8 – воздуходувка;  
 9 – приводной двигатель; 10 – пароперегреватель; 11 – манометр;  
 12 – паровой электрокотел; 13 – вентиль; 14 – сосуд с таящим льдом; 15 – потенциометр;  
 16 – термопара; 17 – калориметр; 18 – гидрозатвор; 19 – сосуд для сбора конденсата

Fig. 1. The scheme of the experimental stand:

- 1 – cyclone chamber; 2 – swirler; 3 – entrance channel (slot); 4 – micromanometer;  
 5 – thermometer; 6 – constriction device; 7 – U-shaped manometer; 8 – blower;  
 9 – drive unit; 10 – superheater; 11 – manometer;  
 12 – steam boiler; 13 – valve; 14 – vessel with melting ice; 15 – potentiometer;  
 16 – thermocouple; 17 – calorimeter; 18 – water seal; 19 – vessel for collecting condensate

Греющий пар из электрокотла через пароперегреватель поступал в рабочий участок калориметра. Перегрев пара на его входе поддерживался и непрерывно контролировался протарированной медьконстантановой термопарой. Отсчет ЭДС термопары производили переносным потенциометром. Отвод излишнего пара и паровоздушной смеси осуществляли в охранный участок калориметра (паровую рубашку), а оттуда через отводной штуцер – в дренажную систему. Охранный участок калориметра обеспечивала полную теплоизоляцию рабочей секции. Снаружи и с торцов калориметр был теплоизолирован.

Общее количество теплоты, проходящее через боковую поверхность рабочей секции калориметра, определяли по массе конденсата, собранного в специальный сосуд, весовым способом с точностью до 0,01 г. Время опыта измеряли секундомером. Температуру рабочей поверхности калориметра принимали равной температуре насыщенного пара. Сбор конденсата с рабочего участка калориметра производили через гидравлический затвор, обеспечивающий создание определенного давления в рабочем объеме калориметра. Поддержание требуемых величин избыточного давления и перегрева при изменении нагрузки камеры осуществляли нагревательными

элементами котла и пароперегревателя. Давление греющего пара в течение опыта поддерживали постоянным.

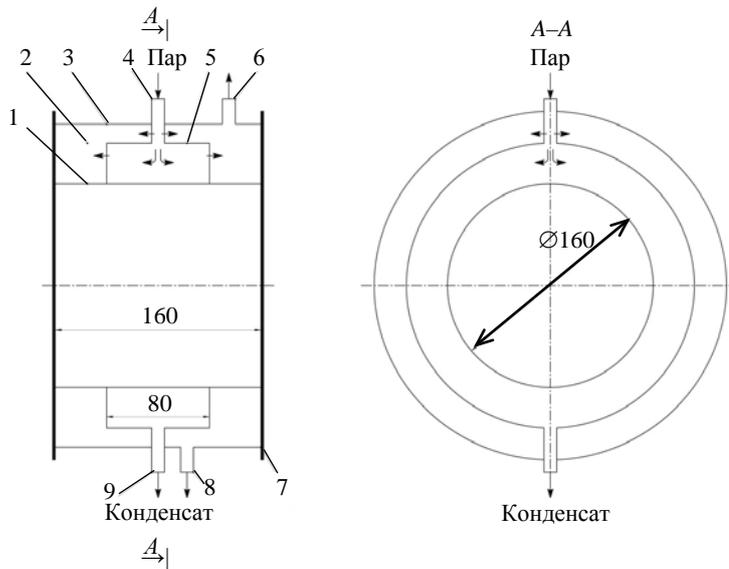


Рис. 2. Схема калориметра: 1 – внутренняя цилиндрическая стенка; 2 – охранный участок; 3 – наружная цилиндрическая стенка; 4 – штуцер подвода пара; 5 – рабочий участок; 6 – продувочный штуцер; 7 – фланец крепления калориметра к камере; 8 – штуцер отвода конденсата в дренаж; 9 – штуцер отвода конденсата на измерение

Fig. 2. The scheme of the calorimeter: 1 – the inner cylindrical wall; 2 – security of land; 3 – outer cylindrical wall; 4 – hose inlet of the pair; 5 – the working portion; 6 – purge fitting; 7 – flange of the calorimeter to the camera; 8 – fitting the condensate to the drain; 9 – the nipple of the condensate dimension

Опыты состояли из пяти серий, каждая из которых характеризовалась величиной относительной площади входа потока в камеру, принимавшей значения: 0,02; 0,04; 0,08; 0,12; 0,21. В каждой серии исследование проводили при  $\bar{d}_{\text{вх}} = 0,2; 0,43; 0,59; 0,74; 1,00$  и значениях продольной координаты  $\bar{z} = 1,75; 3,25; 6,25; 9,25; 10,75; 12,25$ . Во всех рассмотренных вариантах сочетаний  $\bar{f}_{\text{вх}}$ ,  $\bar{d}_{\text{вх}}$  и  $\bar{z}$  опыты выполняли при пяти-шести значениях входного числа Рейнольдса  $Re_{\text{вх}} = v_{\text{вх}} D_k / \nu_{\text{вх}}$ , где  $v_{\text{вх}}$  – скорость потока на входе в камеру (в щлицах);  $\nu_{\text{вх}}$  – кинематический коэффициент вязкости потока в щлицах. Всего выполнено около 500 опытов при хорошей повторяемости результатов.

Полученные опытные данные по теплоотдаче на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры приведены на рис. 3.

Обобщение полученных опытных данных производили в виде уравнения подобия

$$Nu = A Re_{\text{вх}}^n \varepsilon_1 \varepsilon_z, \quad (1)$$

где  $Nu = \alpha D_k / \lambda_{\text{вх}}$  – местное число Нуссельта;  $\alpha$  – местный коэффициент теплоотдачи;  $\lambda_{\text{вх}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха на входе в ка-

меру;  $\varepsilon_r = \bar{f}_{\text{вх}}^m \bar{d}_{\text{вых}}^l$  – множитель, учитывающий влияние относительных геометрических входных и выходных характеристик камеры;  $\varepsilon_z = \bar{z}^k$  – то же, учитывающий изменение числа Nu вдоль длины рабочего объема камеры;  $A$  – коэффициент пропорциональности;  $m, l, k$  – постоянные величины.

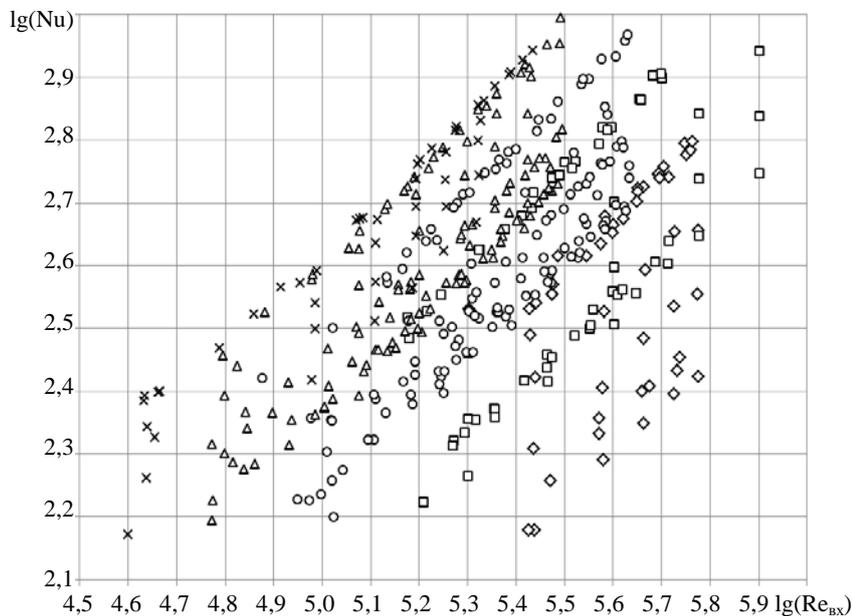


Рис. 3. Опытные данные по теплоотдаче на боковой поверхности циклонной камеры большой относительной длины:  $\diamond - \bar{f}_{\text{вх}} = 0,02$ ;  $\square - 0,04$ ;  $\circ - 0,08$ ;  $\Delta - 0,12$ ;  $\times - 0,21$

Fig. 3. Experimental data on heat transfer on the lateral surface of cyclone chamber of a great relative length for:  $\diamond - \bar{f}_{\text{вх}} = 0.02$ ;  $\square - 0.04$ ;  $\circ - 0.08$ ;  $\Delta - 0.12$ ;  $\times - 0.21$

Представленные данные позволяют отметить, что в относительно длинных циклонных камерах пренебрежимо слабое влияние на теплоотдачу на боковой поверхности рабочего объема оказывают условия вывода газов (относительный диаметр выходного отверстия  $\bar{d}_{\text{вых}}$ ). Интенсивность теплоотдачи главным образом зависит от условий ввода потока в камеру (относительной площади входа  $\bar{f}_{\text{вх}}$ ). Установлено, что  $l \approx 0$  и  $m = 0,4$ , т. е.

$$\varepsilon_r = \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4}, \tag{2}$$

а показатель степени  $k$  имеет следующую зависимость:

$$k = -0,15 \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,254}. \tag{3}$$

Локальные коэффициенты теплоотдачи на боковой поверхности циклонной камеры убывают по мере продвижения потока к выходному отверстию (с увеличением продольной координаты  $\bar{z}$ ). В общем случае показа-

тель  $n$  зависит от относительной площади входа потока. В пределах значений  $\bar{f}_{\text{вх}}$ , рассмотренных в работе, он может изменяться от 0,80 до 0,72. Однако имевший место разброс значений  $n$  не позволил сформулировать достаточно точные количественные рекомендации по учету его изменения. Приближенно можно считать, что

$$n = 0,63 \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,07}. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение (1) с учетом (2)–(4) приобретает вид

$$\text{Nu} = A \text{Re}_{\text{вх}}^{0,63 \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,07}} \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4} \bar{z}^{-0,15} \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,254}. \quad (5)$$

Выражение (5) применимо при  $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,02\text{--}0,21$  в диапазоне  $\text{Re}_{\text{вх}} = (0,59 \dots 5,98) \cdot 10^5$ . Следует заметить, что интенсивность теплоотдачи в сечениях, ближайших к выходному торцу, оказывается на 7–8 % больше значений, определенных по (5). Последнее, вероятно, связано с перестройкой потока в окрестности выходного отверстия.

Если в расчетной формуле (5) использовать среднее значение показателя  $n$ , наблюдавшееся в опытах, то она примет следующий вид:

$$\text{Nu} = 0,177 \text{Re}_{\text{вх}}^{0,75} \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4} \bar{z}^{-0,15} \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,254}. \quad (6)$$

Сопоставление расчетной формулы (6) с опытными данными приведено на рис. 4.

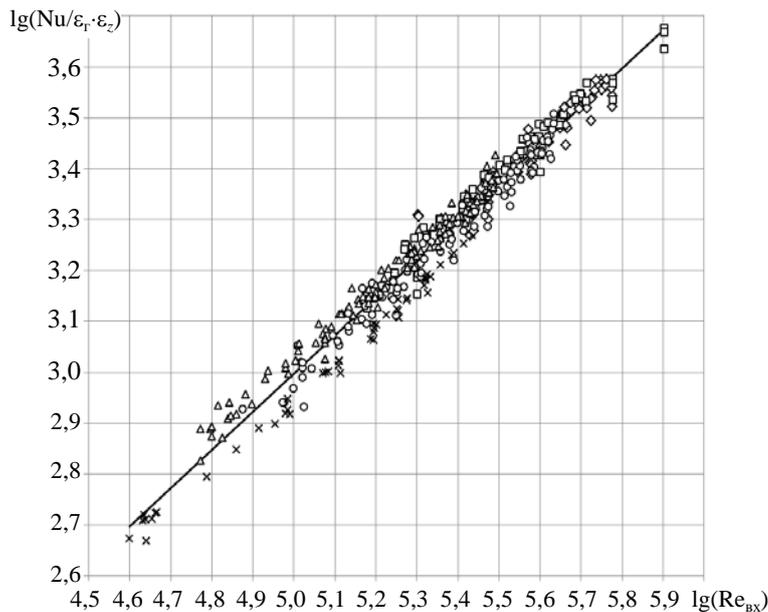


Рис. 4. Конвективный теплообмен на боковой поверхности относительно длинных циклонных камер

Fig. 4. Convective heat transfer on the lateral surface of relatively long cyclonic chambers

На рис. 4 использованы обозначения параметра  $\bar{f}_{\text{вх}}$ , ранее применявшиеся на рис. 3. Отклонение большинства опытных данных от обобщающей расчетной зависимости не превышало  $\pm 14\%$ .

### ВЫВОДЫ

1. Основным параметром, определяющим интенсивность теплоотдачи на боковой поверхности рабочего объема циклонных камер большой относительной длины, является относительная площадь входа потока.

2. Величина относительного диаметра выходного отверстия рабочего объема циклонных камер большой относительной длины оказывает незначительное влияние на теплоотдачу его боковой поверхности.

3. Полученные обобщенные уравнения теплоотдачи на боковой поверхности относительно длинных циклонных камер вполне удовлетворительно соответствуют результатам опытов и могут быть использованы для инженерных расчетов теплоотдачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сабуров, Э. Н. Исследование теплоотдачи на боковой поверхности рабочего объема циклонных камер с двусторонним торцевым выводом газов / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов, Н. В. Смолина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ. 1998. № 4. С. 49–54.
2. Сабуров, Э. Н. Конвективный теплообмен в циклонных секционных нагревательных устройствах / Э. Н. Сабуров, С. И. Осташев. Архангельск: Изд-во Арх. гос. техн. ун-та, 2004. 192 с.
3. Зайцева, М. Л. Теплоотдача на боковой поверхности циклонных камер большой относительной длины с вводом газов вблизи выходного торца / М. Л. Зайцева, А. Н. Орехов, Э. Н. Сабуров // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. Т. 2, № 4. С. 19–21.
4. Сабуров, Э. Н. Теплоотдача цилиндра, соосного с рабочим объемом циклонной камеры с двусторонним несимметричным вводом газов / Э. Н. Сабуров, Н. В. Смолина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ. 2014. № 2. С. 74–78.
5. Сабуров, Э. Н. Теплоотдача на боковой поверхности рабочего объема циклонных камер с двусторонними несимметричными вводом и выводом газов / Э. Н. Сабуров, Н. В. Смолина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ. 2014. № 4. С. 56–62.
6. Особенности обтекания и теплоотдача цилиндра, смещенного с оси циклонного потока / Ю. Л. Леухин [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 3–4. С. 20–31.
7. Леухин, Ю. Л. Особенности аэродинамики и теплоотдача цилиндра, смещенного с оси циклонного потока / Ю. Л. Леухин, Э. Н. Сабуров // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. трудов. Архангельск: Арх. гос. техн. ун-т, 2004. С. 129–139.
8. Обтекание и теплоотдача цилиндра и группы цилиндров в циклонном потоке / Ю. Л. Леухин [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. 2008. Т. 3. С. 56–63.
9. Леухин, Ю. Л. Исследование обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока / Ю. Л. Леухин, Э. Н. Сабуров // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: материалы V междунар. конф., Казань, 19–22 окт. 2015 г. Казань: Свое издательство, 2015. С. 215–216.

10. Сабуров, Э. Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э. Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. книж. изд-во, 1995. 341 с.

Поступила 10.06.2016 Подписана в печать 12.08.2016 Опубликовано онлайн 29.11.2016

## REFERENCES

1. Saburov E. N., Karpov S. V., Smolina N. V. (1998) The Study of Heat Transfer on the Lateral Surface of the Working Volume of the Cyclone Chambers with Two-Sided End of the Output Gases. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (4), 49–54 (in Russian).
2. Saburov E. N., Ostashev S. I. (2004) *Convective Heat Exchange in Cyclone Sectional Heating Devices*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ. 192 (in Russian).
3. Zaitseva M. L., Orekhov A. N., Saburov E. N. (2013) Heat Transfer on the Lateral Surface of Cyclone Chambers of the Great Relative Length of the Input Gas in Close Proximity to the Output End. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Herald of the Cherepovets State University], 2 (4), 19–21 (in Russian).
4. Saburov E. N., Smolina N. V. (2014) Heat Transfer of Cylinder Being Coaxial with Effective Volume of Cyclone Chamber with Double Asymmetrical Gas Inlet. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [ENERGETIKA. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (2), 74–78 (in Russian).
5. Saburov E. N., Smolina N. V. (2014) Heat Dissipation on the Lateral Surface of Cyclone Chamber with Asymmetrical Two-Way Gas Input and Output. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (4), 56–62 (in Russian).
6. Leukhin Yu. L., Saburov E. N., Usachev I. A., Garen B. (2008) Specific Features of Flow and Heat Transfer of a Cylinder Displaced from the Axis of Cyclonic Flow. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions. Power Production Problems], (3–4), 20–31 (in Russian).
7. Leukhin Yu. L., Saburov E. N. (2004) Specific Features of the Aerodynamics and Heat Transfer of a Cylinder Displaced from the Axis of Cyclonic Flow. *Ohrana Okruzhajushhej Sredy i Racionalnoe Ispolzovanie Prirodnih Resursov: Sb. Nauch. Trudov* [Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources: Collected Works]. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University, 129–139 (in Russian).
8. Leukhin Yu. L., Saburov E. N., Usachev I. A., Garen B. (2008) Flow and Heat Transfer of a Cylinder and Groups of Cylinders in the Cyclone Flux. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Herald of the Cherepovets State University], (3), 56–63 (in Russian).
9. Leukhin Yu. L., Saburov E. N. (2015) The Study of Flow Around a Cylinder Displaced from the Aerodynamic Axis of Cyclonic Flow. *Teploobmen i Gidrodinamika v Zakruchennykh Potokah: Mater. V Mezhdunar. Konf.* [Heat Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows: Materials of the V<sup>th</sup> International Conference]. Kazan, Svoe Izdatelstvo Publ., 215–216 (in Russian).
10. Saburov E. N. (1995) *Cyclone Heating Devices with Intensification of Convective Heat Exchange*. Arkhangelsk, Northwestern Publishing House. 341 (in Russian).

Received: 10 June 2016 Accepted: 12 August 2016 Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-582-590

UDC 538.4

## To Evaluation Test of Quality of Magnetic Fluids for Magnetofluid Devices

V. G. Bashtovoi<sup>1)</sup>, A. G. Reks<sup>1)</sup>, S. V. Klimovich<sup>1)</sup>, O. Yu. Volkova<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Abstract.** Magnetic fluid is a colloid of magnetic nanoparticles. Using of magnetic fluids in technical devices demands applying of strong non-uniform magnetic fields for a long time. One of the most widespread magnetic fluid devices are magnetic fluid seals of mobile shafts, magnetic fluid supports, bearings, acceleration and angle of inclination gauges, devices for information input in the computer and etc. These devices demand high quality of used fluids. Processes of magnetophoresis and Brownian diffusion in magnetic fluid lead to concentration of magnetic particles in the areas with higher intensity of magnetic field and increase of fluid magnetization in these areas. A local change of particles concentration in the fluid leads to variation of its physical properties. Formation of aggregates from the particles and the further stratification of magnetic fluid, up to its destruction, may be the most serious consequence of redistribution of concentration of magnetic particles. These factors lead to variation of parameters of magnetic fluid devices; cause disturbance of their normal operation and even failure. Therefore, the consistent, high quality magnetic fluids which are not subject to fast stratification in a non-uniform magnetic field are necessary for effective work of the devices. The procedure of evaluation test of quality of magnetic fluids is proposed in this paper. The test is based on studying of influence of processes of magnetophoresis and Brownian diffusion of magnetic particles in magnetic fluid on the forces acting on the volume of fluid in an external non-uniform magnetic field. The procedure is developed on the basis of analysis of magnetic force variation in time under the action of non-uniform field of permanent magnets. Methods of determination of stability of magnetic fluid, known at present, demand rather complicated equipment and laborious and complex investigations. Proposed procedure can be used as an express method for evaluation of magnetic fluid quality for usage in technical devices, and it does not need complicated equipment.

**Keywords:** magnetic fluid, magnetic fluid device, magnetophoresis, Brownian diffusion, quality of magnetic fluids, stability of magnetic fluids

**For citation:** Bashtovoi V. G., Reks A. G., Klimovich S. V., Volkova O. Yu. (2016) To Evaluation Test of Quality of Magnetic Fluids for Magnetofluid Devices. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 582–590 (in Russian)

---

### Адрес для переписки

Баштовой Виктор Григорьевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-24  
unesco@bntu.by

### Address for correspondence

Bashtovoi Viktor G.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-24  
unesco@bntu.by

---

## К оценке качества магнитных жидкостей для магнитожидкостных устройств

В. Г. Баштовой<sup>1)</sup>, А. Г. Рекс<sup>1)</sup>, С. В. Климович<sup>1)</sup>, О. Ю. Волкова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Университет Ниццы – Софии Антиполис (Ницца, Франция)

**Реферат.** Магнитная жидкость представляет собой коллоид наночастиц магнетита. Применение магнитных жидкостей в технических устройствах имеет особенность, связанную с необходимостью использования сильно неоднородных магнитных полей в течение длительного промежутка времени. Одними из наиболее распространенных магнитожидкостных устройств являются магнитожидкостные уплотнения подвижных валов, магнитожидкостные опоры, подшипники, датчики ускорения, угла наклона, устройства для ввода информации в ЭВМ и т. п. Данные устройства предъявляют высокие требования к качеству используемых жидкостей. При воздействии неоднородных магнитных полей в магнитной жидкости происходят процессы магнитофореза и броуновской диффузии, что приводит к концентрации магнитных частиц в областях магнитной жидкости с большей напряженностью магнитного поля и увеличению намагниченности жидкости в данных областях. Локальное изменение концентрации частиц в жидкости изменяет ее физические свойства. Наиболее серьезным следствием переконцентрации магнитных частиц может быть образование агрегатов из частиц и дальнейшее расслоение магнитной жидкости вплоть до ее разрушения. Эти факторы приводят к изменению параметров магнитожидкостных устройств, нарушению их работоспособности и даже выводу из строя. Поэтому для их эффективной работы необходимы устойчивые, качественные магнитные жидкости, не подверженные быстрому расслоению в неоднородном магнитном поле. В данной работе предлагается методика оценки качества магнитных жидкостей, основанная на изучении влияния процессов магнитофореза и диффузии броуновских магнитных частиц в магнитной жидкости на силы, действующие в объеме жидкости во внешнем неоднородном магнитном поле. Методика создана на основе анализа характеристик изменения магнитной силы во времени в неоднородном поле постоянных магнитов. Известные в настоящее время методы определения устойчивости магнитной жидкости требуют достаточно сложного аппаратного оформления и трудоемкой процедуры выполнения комплекса исследований. Предлагаемая методика может быть использована в качестве экспресс-метода оценки качества магнитной жидкости для ее применения в технических устройствах, и она не требует сложной аппаратуры.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитожидкостное устройство, магнитофорез, броуновская диффузия, качество магнитных жидкостей, устойчивость магнитных жидкостей

**Для цитирования:** К оценке качества магнитных жидкостей для магнитожидкостных устройств / В. Г. Баштовой [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 582–590

### Introduction

Appearance of magnetic fluids which uniquely combine fluidity and strong magnetic properties, has led to creation of new magnetic fluid devices which now are widely used in various branches of industry, especially in power, mechanical engineering, instrument-making, electronics, and vacuum techniques [1–4]. Peculiarity of application of magnetic fluids in technical devices is connected with necessity of use of strong non-uniform magnetic fields during a long time. Therefore, magnetic fluids must be of high quality. Magnetic fluids are colloid of high-dispersed magnetic particles. Therefore, processes of magne-

tophoresis and diffusion of particles in volume of the fluid lead to redistribution of their concentration under the action of magnetic field [5, 6]. When magnetic fluid is of poor quality due to many magnetic particles of big size (more than 15 nanometers) and magnetic particles are stabilized badly by surfactant the formation of large aggregates and settling of them occur in magnetic fields. This leads to fluid destruction.

One of the most widespread magnetic fluid devices are magnetic fluid seals of mobile shafts [1–3], which make the most rigid demands to the quality of magnetic fluids. To provide shaft sealing at considerable pressure drops, it is necessary to create a considerable force, acting on the volume of magnetic fluid in the sealed gap. For this purpose creation of strongly non-uniform magnetic field with a gradient of intensity to  $10^9$  A/m<sup>2</sup> is required. However, under the action of non-uniform magnetic field in the volume of magnetic fluid, the processes of moving of magnetic particles occur actively, which leads to redistribution of their concentration. As a result, forces acting on the magnetic fluid may undergo considerable changes in the course of time and thereby conditions for sealing of the shaft may change.

Magnetic fluid supports [1–3], accelerometers, devices for information input in computers [4] have high requirements for quality of fluids. The principle of work of the given devices is based on floating of inertial bodies in the container filled with magnetic fluid. Position of the inertial body against container walls should be accurately fixed. In case of a poor quality fluid the body position may spontaneously vary because of the change of magnetic force. This disturbs a normal operation of the device.

The purpose of results presented below is to contribute to development of techniques of preliminary estimation of quality of magnetic fluids for their reliable use in different kinds of devices. The methods of determination of magnetic fluid stability, proposed by this time, demand a composite implementation and laborious procedure for carrying out of researches [7–9].

Proposed technique of estimation of magnetic fluids quality is based on studying of influence of magnetophoresis processes and of Brownian diffusions of magnetic particles in magnetic fluid on the forces acting in the volume of the fluid in an external non-uniform magnetic field.

Magnetic fluid is a colloid of magnetic nanoparticles, so there are processes of magnetophoresis and Brownian diffusion in magnetic fluids under the action of non-uniform magnetic fields [5, 10]. Magnetic particles concentrate in the areas of magnetic fluid with higher intensity of magnetic field  $H$ , and it brings to increase of fluid magnetization  $M$  in these areas. In case of nonlinear distribution of magnetic field intensity in the fluid volume, areas form with the maximum gradient of intensity of the magnetic field and the fluid magnetization. Magnetic force acting on the volume of the magnetic fluid is defined by the product of magnetization and the field gradient, and consequently, it grows nonlinearly with time [10, 11]. Thus, magnetophoresis and Brownian diffusion have an influence on the force drawing the volume of magnetic fluid to the poles of the source of the magnetic field. This force may be named “magnetic weight”.

The scheme of the experimental unit for investigation of the influence of magnetophoresis and Brownian diffusion on the magnetic force acting on the volume of magnetic fluid is presented in fig. 1.

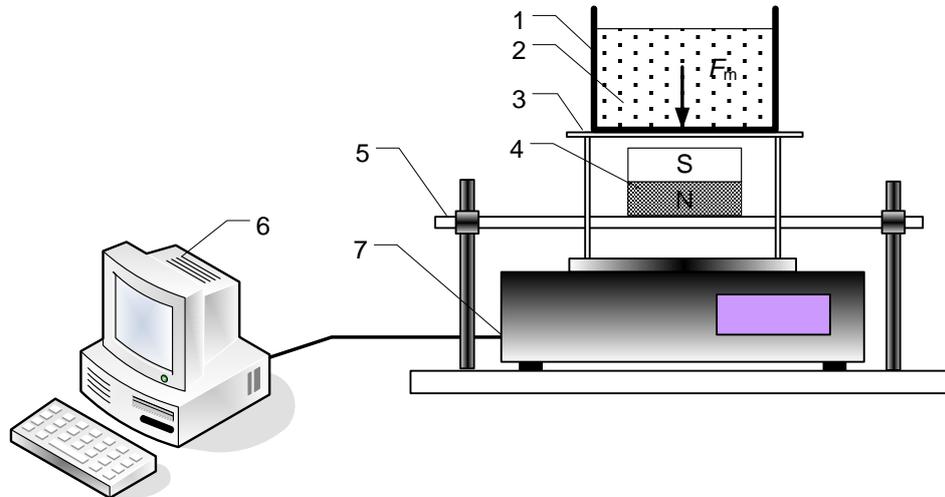


Fig. 1. Scheme of experimental stand

Cuvette 1 from nonmagnetic material, filled with magnetic fluid 2, is placed on nonmagnetic support 3 which is placed on electronic scales 7. The source of vertically non-uniform magnetic field 4 is placed under the cuvette with the fluid on the other nonmagnetic support 5.

Since direction of the field gradient is vertical, the magnetic force acting on the volume of magnetic fluid has the vertical direction too, coinciding with a direction of gravity. This fact allows to use scales for measurement of magnetic force. Electronic scales are connected to computer 6 to register the change of magnetic weight of magnetic fluid. In experiments scales OHAUS Adventurer AR2140 are used.

Systems of permanent rectangular ferrite-barium magnets of mark 2BA with the geometrical sizes  $10 \times 20 \times 5$  mm are used as a source of vertically non-uniform magnetic field. Magnets, magnetised perpendicularly to the greatest side, are established so that in the volume of magnetic fluid the magnetic field of vertical direction with the gradient of intensity directed vertically downwards is created. Investigation of the vertical distribution of the field of magnets has shown that in the area of the cuvette bottom the maximum intensity  $H$  of magnetic field reached the value of 61 kA/m, and gradient of magnetic field intensity is to 12200 kA/m<sup>2</sup>. At the layer thickness of 10 mm of magnetic fluid in the field of its blanket, the magnetic field had intensity of 12 kA/m and gradient of intensity – 1850 kA/m<sup>2</sup>.

Investigations were carried out with magnetic fluids based on transformer oil. In these fluids, magnetic nanoparticles covered by the surfactant (oleate sodium) acted as a magnetic phase. The basic physical properties of the magnetic fluid samples are presented in tabl. 1. Data concerning the sizes

of magnetic nanoparticles are received from the analysis of magnetisation curve of magnetic fluids samples [3].

Table 1

Properties of magnetic fluid samples

Magnetic fluid	MOT-20	MOT-29	MOT-31	MOT-39
Magnetization of saturation, kA/m	19.9	29.4	31.2	38.6
Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	1128	1230	1274	1420
Volume concentration of magnetic particles, %	4.4	6.1	6.3	8.0
Max. diameter of particles, nm	13.2	10.8	11.1	11.3
Min. diameter of particles, nm	8.6	8.4	8.4	8.1
Dynamic viscosity $\eta$ , Pa·s	0.0344	0.0356	0.0367	0.0797

Intensity of diffusion processes and of Brownian motion in magnetic fluid is described by dimensionless parameter  $U = \mu_0 m_m H_0 / kT$ , which represents a relation of magnetic particle energy in magnetic field and its thermal energy [10]. Here  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$  G/m is magnetic permeability of vacuum,  $m_m$  is magnetic moment of the particle,  $k$  is Boltzmann constant,  $T$  is absolute temperature.

Due to the change from one to four of the system from the set of constant ferrite-barium magnets in the bottom of the cuvette with magnetic fluid, dimensionless criterium  $U$  varied from 2.45 to 6.60 at the performance of experiments.

In a non-uniform magnetic field redistribution of concentration of magnetic particles in magnetic fluids leads, in the course of time, to increase of concentration of magnetic particles near to the cuvette bottom. It causes the growth of magnetic weight  $F$  of the fluid in time (fig. 2).

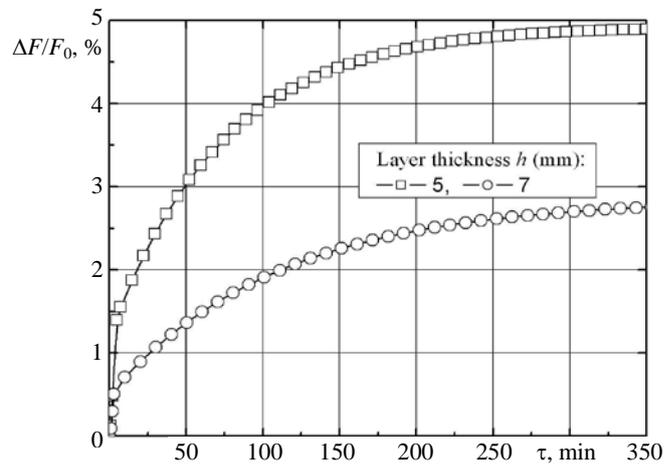


Fig. 2. Time dependence of the relative variation of the magnetic weight of the layers of magnetic fluid MOT-31 of different depth

In the figure  $\Delta F = F - F_0$  is absolute variation of magnetic force,  $F_0$  is magnetic force at the initial moment of activation of magnetic field. This variation occurs the most noticeably at the initial period of time, and further, with the time the fluid weight reaches stationary value and practically does not change. It is stated that the time of reaching the stationary value is from two to three hours, and it corresponds to theoretical estimations [10].

Influence of the diffusion process on magnetic weight variation is more distinct, the more the value of magnetic parameter  $U$  is [10]. In fig. 2, dependences for the layers of magnetic fluid of different depth in identical magnetic fields are presented. Average values of parameter  $U$  for the layers in depth 5 and 7 mm are 4.1 and 2.9 respectively. It is visible that for the layer of a smaller depth characterized by a higher value of parameter  $U$ , a considerably larger variation of acting magnetic force is observed.

According to theoretical estimations variation of magnetic force can reach 10 % due to diffusion [10]. In fig. 3 the dependences characterizing variation of magnetic force acting on magnetic fluid samples in a wide range of magnetization of saturation are presented.

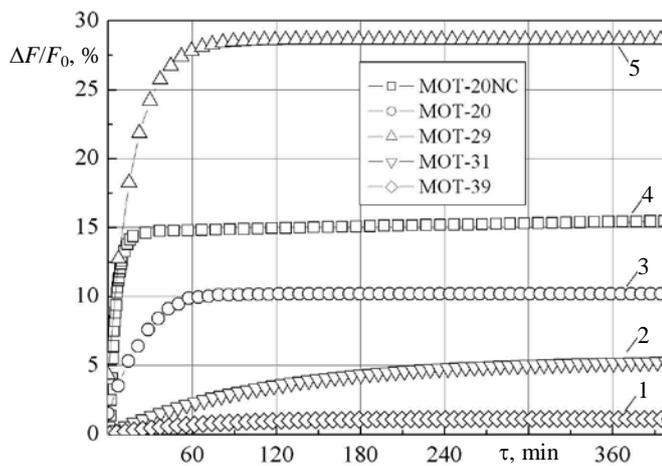


Fig. 3. Time dependence of relative variation of magnetic weight of magnetic fluid samples of different magnetization of saturation

In experiments for all samples of magnetic fluid with stable in time properties a relative change of weight has not exceeded 10 % that is quite accounted for diffusion processes (fig. 3, curves 1–3).

The dependences presented by curves 1–3 are received for magnetic fluids from which for stability increase large magnetic particles and aggregates are removed by centrifugation.

A sample of magnetic fluid MOT-20 was tested in magnetic field twice – before and after centrifugation with acceleration 6000 g. In the sample of fluid before centrifugation (MOT-20NC) a presence of larger magnetic particles and their aggregates is possible. Therefore in a non-uniform magnetic field their fast movement to the area of the stronger magnetic field and sedimentation take

place. Due to this, a considerable variation of acting magnetic force at the initial moment of time and its coming out to a stationary value (fig. 3, a curve 4) is observed. Subsequently, the given sample of the fluid has appeared steady and has not shown tendency to stratification.

In an hour after switching off the magnetic field the samples of fluid, variation of magnetic weight of which is characterized by dependences 1–3 in fig. 3, have been investigated repeatedly for physical properties (magnetization and density). Tests were taken from the top and the bottom parts of the layer. Their physical properties turned out identical.

Similar investigations have been carried out with a great number of samples of magnetic fluid. It was stated that when magnetic force variation in a non-uniform magnetic field did not exceed 10 %, redistribution of concentration of magnetic particles had reversible character, and fluids were characterized by stability of properties. Their use in technical devices did not cause any problems subsequently.

Magnetic fluids of poor quality are characterized by instability of properties because of propensity to sedimentation in gravitational and magnetic fields. Sedimentation may occur in presence of large magnetic particles and at a bad stabilization of magnetic particles by surfactant as well, therefore they cooperate with each other, stick together and form large aggregates. As time goes on, these aggregates drop out in a precipitate. As concentration of magnetic phase in the fluid decreases, then its physical properties change, stratification and even destruction occurs.

Therefore, in magnetic fluid of poor quality in a non-uniform magnetic field, a redistribution of particles concentration and fluid stratification take place more intensively, which leads to stronger increase in time of magnetic weight of the fluid in comparison with better quality fluids. Such considerable change of force is well illustrated by fig. 3, where comparative dependences of relative variation of weight in time for a set of qualitative magnetic fluids (MOT-39, curve 1; MOT-31, curve 2 and MOT-20, curve 3) and for a poor quality fluid MOT-29 (curve 5) are presented.

It is necessary to notice that in poor quality fluids there is an irreversible redistribution of concentration of magnetic particles in a non-uniform magnetic field. Results of investigation of magnetic properties of different layers of magnetic fluid sample MOT-29 testify to it after its exposure within eight hours in a non-uniform magnetic field. For this purpose sampling of magnetic fluid in the beginning and in the end of the experiment from the surface and the bottom layers was made and their magnetic properties were measured. The received results of investigations are given in tabl. 2.

In the bottom layer of magnetic fluid which is in the area of a stronger field, there is an increase of magnetic particles concentration, in the result of which the magnetic susceptibility of the fluid and magnetization of saturation grow. Visual observation of the fluid sample, taken from the bottom of the cuvette, showed paste like condition. By this, loosing force of magnetic properties of the fluid top layer is observed. Before the experiment the fluid had magnetization of satura-

tion of 29.4 kA/m, after being in a non-uniform magnetic field magnetization of saturation of the top and the bottom layers became 32.6 and 21.0 kA/m respectively.

Table 2

Physical properties of magnetic fluid MOT-29 before and after magnetic field acting

Parameters	Initial fluid MOT-29	Fluid MOT-29 after acting of the fluid	
		Surface layer	Bottom layer
Magnetization of saturation, kA/m	29.4	21.0	32.6
Magnetic concentration of particles, %	6.13	4.38	6.79
Initial magnetic susceptibility	1.0	0.6	1.4

The estimation of granulate structure of the given sample of fluid in magnetization curve has shown that the bottom layers of the fluid are characterized by larger sizes of magnetic particles.

The quality (stability) of the fluid samples may be illustrated by the impregnation and drying of the magnetic fluid drop on a filter paper. It is shown in fig. 4.



Fig. 4. Photos of the dried drops of the poor quality magnetic fluid and the qualitative one:  
 a – MOT-29; b – MOT-39

In fig. 4 photos of drops of the sample of poor quality magnetic fluid MOT-29 and the sample of high quality MOT-39 are presented for comparison. At drying point, less stable (poor quality) fluid where processes of redistribution of particles concentration occur much more intensively, a stratification and sedimentation of particles in the central part of the drop takes place. By this, the fluid-carrier continues to impregnate the paper. As a result, round the “knob” of magnetite particles the halo of the fluid-carrier is formed (fig. 4a). Stable, qualitative fluid MOT-39 dries uniformly on the occupied area of the paper and forms a homogenous spot that is well visible in fig. 4b.

## CONCLUSIONS

1. The fulfilled investigations have shown that under the influence of a non-uniform magnetic field of constant magnets the processes of diffusion and Brownian motion in magnetic fluid occur actively, which influences the magnetic force acting on the volume of magnetic fluid.

2. The analysis of characteristics of magnetic force variation in time may lay down in the basis of the technique of an operative estimation of quality of magnetic fluid.

3. The proposed method can be used as an express method for estimation of quality and stability of magnetic fluid for its use in technical devices and it does not demand composite equipment.

The work is carried out under support of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

It is presented by the UNESCO Chair “Energy conservation and renewable Energies”.

## REFERENCES

1. Berkovsky B., Bashtovoi V. (Ed.) (1996) *Magnetic Fluids and Applications Handbook*. New York, Begell House Inc. Publishers. 851.
2. Rosensweig R. E. (1985) *Ferrohydrodynamics*. USA: Cambridge University Press. 344.
3. Berkovsky B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. (1989) *Magnetic Fluids*. Moscow, Chemistry. 240 (in Russian).
4. Suprun A., Romanov Yu., Simonenko D. (2001) Device for Inputting Information into the Computer. Patent No 2168201 Russian Federation (in Russian).
5. Landau L. D., Lifshitz E. M. (1986) *Theoretical Physics. Vol. VI: Gidrodinamika*. Moscow, Science. 736 (in Russian).
6. Bashtovoi V. G., Berkovsky B. M., Vislovich A. N. (1985) *Introduction to Thermomechanics Magnetic Fluids*. Moscow: IVTAN USSR. 188 (in Russian).
7. Kaiser R., Miskolczy G. (1970) Magnetic Properties of Stable Dispersions of Subdomain Magnetite Particles. *Journal of Applied Physics*, 41 (3), 1064–1072. DOI: 10.1063/1.1658812.
8. Mikhalev Y. O., Evsin S. I. (1991) Diagnostic Methods of Magnetic Fluids for Sealing Devices. *Magneto hydrodynamics*, 27 (1), 29–35.
9. Mikhalev Y. O., Novikov S. I., Orlov D. V., Trofimenko M. I. (1982) The Process of Determining the Stability of Magnetic Colloids. Copyright Certificate USSR No 922586.
10. Bashtovoi V. G., Polevikov V. K., Suprun A. E., Stroots A. V., Beresnev S. A. (2007). Influence of Brownian Diffusion on the Statics of Magnetic Fluid. *Magneto hydrodynamics*, 43 (1), 17–25.
11. Bashtovoi V. G., Reks F. G., Klimovich S. V. (2014) Experimental Research of Magnetophoresis and Brownian Diffusion Influence on “Magnetic Weight” of Magnetic Fluid. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (1), 65–69 (in Russian).

Received: 19 January 2016

Accepted: 22 Mart 2016

Published online: 29 November 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-591-603

УДК 621.039

## **Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением**

**С. М. Дмитриев<sup>1)</sup>, А. А. Баринев<sup>1)</sup>, А. Н. Пронин<sup>1)</sup>, В. Д. Сорокин<sup>1)</sup>,  
А. Е. Хробостов<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева  
(Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя за различными вариантами конструкций дистанционирующих и перемешивающих решеток, разработанных для топливных кассет отечественных и зарубежных ядерных реакторов. Для проведения исследований изготовлены модели следующих топливных кассет: ТВСА для реакторов ВВЭР и ВБЭР, ТВС-КВАДРАТ для реакторов PWR и ТВС реактора КЛТ-40С. Все модели выполнены в полном геометрическом подобии с натурными кассетами. Исследования проводили путем моделирования течения теплоносителя в активной зоне воздухом на аэродинамическом стенде. Для измерения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя использовали специальные пневмометрические датчики, позволяющие измерять полный вектор скорости в точке по трем его компонентам. Для изучения процессов массообмена использовали метод пропанового трассера. При проведении исследований гидродинамики потока измеряли поперечные скорости потока теплоносителя, расходы теплоносителя по ячейкам модели. Исследование массообменных процессов заключалось в изучении распределения концентрации трассера в экспериментальной модели, определении длин затухания массообменных процессов за перемешивающими решетками, расчете коэффициентов межячейкового массообмена. Накопленная база данных по течению теплоносителя в тепловыделяющих сборках для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкций активных зон. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов конструкции перемешивающих решеток учитывались конструкторами АО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию тепловыделяющих сборок. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

**Ключевые слова:** гидродинамика, массообмен, теплоноситель, реакторная установка, перемешивающие решетки

**Для цитирования:** Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 591–603

---

**Адрес для переписки**  
Дмитриев Сергей Михайлович  
Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексева  
ул. Минина, 24,  
603155, г. Нижний Новгород,  
Российская Федерация  
Тел.: +7 831 436-23-25  
dmitriev@nntu.nnov.ru

**Address for correspondence**  
Dmitriev Sergey M.  
Nizhny Novgorod State Technical  
University named after R. E. Alekseev  
24 Minin str.,  
603155, Nizhny Novgorod,  
Russian Federation  
Tel.: +7 831 436-23-25  
dmitriev@nntu.nnov.ru

---

## Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors

S. M. Dmitriev<sup>1)</sup>, A. A. Barinov<sup>1)</sup>, A. N. Pronin<sup>1)</sup>, V. D. Sorokin<sup>1)</sup>, A. E. Khrobostov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev  
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

**Abstract.** The results of experimental studies of local hydrodynamics and mass exchange of coolant flow behind spacer and mixing grids of different structural versions that were developed for fuel assemblies of domestic and foreign nuclear reactors are presented in the article. In order to carry out the study the models of the following fuel assemblies have been fabricated: FA for VVER and VBER, FA-KVADRAT for PWR-reactor and FA for KLT-40C reactor. All the models have been fabricated with a full geometrical similarity with full-scale fuel assemblies. The study was carried out by simulating the flow of coolant in a core by air on an aerodynamic test rig. In order to measure local hydrodynamic characteristics of coolant flow five-channel Pitot probes were used that enable to measure the velocity vector in a point by its three components. The tracer-propane method was used for studying mass transfer processes. Flow hydrodynamics was studied by measuring cross-section velocities of coolant flow and coolant rates according to the model cells. The investigation of mass exchange processes consisted of a study of concentration distribution for tracer in experimental model, in determination of attenuation lengths of mass transfer processes behind mixing grids, in calculating of inter-cellular mass exchange coefficient. The database on coolant flow in fuel assemblies for different types of reactors had been accumulated that formed the basis of the engineering substantiation of reactor cores designs. The recommendations on choice of optimal versions of mixing grids have been taken into consideration by implementers of the JSC "OKBM Afrikantov" when creating commissioned fuel assemblies. The results of the study are used for verification of CFD-codes and CFD programs of detailed cell-by-cell calculation of reactor cores in order to decrease conservatism for substantiation of thermal-mechanical reliability.

**Keywords:** hydrodynamics, mass transfer, coolant, reactor, mixing grids

**For citation:** Dmitriev S. M., Barinov A. A., Pronin A. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2016) Experimental Study of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of Pressurized Water Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 591–603 (in Russian)

### Введение

Уровень развития современного реакторостроения в значительной мере зависит от изучения гидродинамики и тепломассообмена теплоносителя в активной зоне (АЗ) ядерного реактора. Необходимость знания процессов тепломассообмена и гидродинамики определяется тем, что ядерные реакторы представляют собой высокоэнергонапряженные аппараты, в которых данные процессы проявляются в весьма сложной форме. С одной стороны, принятие существенных запасов по параметрам теплоносителя ограничивает как мощность, так и КПД ядерно-энергетической установки в целом, что нецелесообразно с экономической точки зрения. С другой стороны, превышение локальных параметров теплоносителя (теплового потока, температуры, энтальпии) в АЗ сверх допустимых пределов может привести к выходу реактора из строя, что недопустимо с точки зрения безопасности [1].

Программы развития атомной энергетики ведущих стран мира предполагают использование реакторов с водой под давлением в качестве основы коммерческого парка ядерных установок. Реакторы данного типа работают в составе стационарных и транспортных реакторных установок (РУ), имеют огромную суммарную наработку и опыт успешной эксплуатации. Современные проекты таких реакторов сочетают отработанные, ставшие традиционными, технические решения с инновационными разработками. В последние годы РУ с водой под давлением переводятся на повышенные уровни мощности при одновременных нагрузках с уменьшенной утечкой нейтронов и более продолжительным топливным циклом. Задачи повышения мощности становятся актуальными и требуют улучшения теплогидравлических характеристик самих тепловыделяющих сборок (ТВС). Повышение мощности АЗ может обеспечиваться путем совершенствования конструкции дистанционирующих устройств. Улучшение теплогидравлических характеристик ТВС может быть достигнуто как размещением на дистанционирующих решетках (ДР) определенного количества конструктивных элементов (интенсификаторов теплосъема), так и использованием специально изготовленных перемешивающих решеток (ПР). В последнем случае функции дистанционирования на них могут и не возлагаться.

#### **Современная проблематика совершенствования тепловыделяющих сборок**

Важными задачами атомной энергетики РФ являются: повышение мощности и надежности работающих АЭС, создание первой в мире плавучей АЭС, выход на западный рынок ядерного топлива и др. Привнося значительный вклад в достижение поставленных целей, в ОАО «ОКБМ Африкантов» (РФ, г. Нижний Новгород) выполняются разработки ТВС для реакторов различных типов. Проведены обширные инженерные изыскания в отношении ТВС реакторов с водой под давлением отечественных и зарубежных проектов, результатом которых стало создание опытных и промышленных образцов топливных кассет. К таким кассетам относятся: ТВСА для реакторов ВВЭР и ВБЭР, ТВС КЛТ-40С для плавучей атомной станции, ТВС-КВАДРАТ для зарубежных реакторов типа PWR. Перечисленные топливные сборки имеют принципиальные конструктивные отличия от других типов ТВС аналогичного назначения, что позволяет получать более высокие эксплуатационные показатели, в том числе большую мощность АЗ при сохранении уровня теплотехнической надежности. Так, в ТВСА применен силовой уголкового каркаса, минимизирующий деформации пучка твэлов в процессе эксплуатации [2]. Для получения высокой интенсивности теплообмена в данной кассете предложено использовать два конструктивно различных типа решеток – «закрутка вокруг твэла» и «порядная прогонка» (рис. 1).

Применение подобных интенсификаторов в ТВСА позволяет выравнивать температуру (энтальпию) как по сечению, так и по высоте сборки,

а также повысить запасы до кризиса теплоотдачи. В связи с этим становится возможным увеличение тепловой мощности активной зоны. Опыт по созданию перемешивающих решеток был применен и в конструкции кассеты ТВС-КВАДРАТ, для которой разработаны свои типы перемешивающих и комбинированных перемешивающих ДР (рис. 2). Созданные ТВС данного типа не уступают по своим характеристикам зарубежным аналогам.

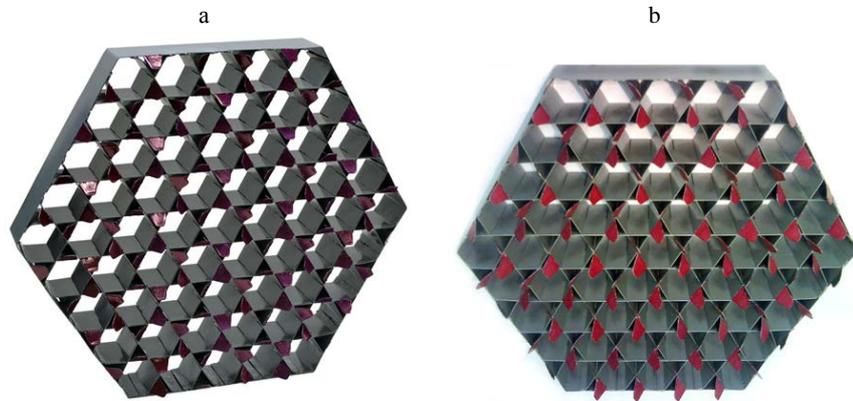


Рис. 1. Фрагменты перемешивающих решеток для ТВСА: а – перемешивающая решетка с дефлектором типа «закрутка вокруг твэла»; б – то же с дефлектором «порядная прогонка»

Fig. 1. Mixing grids fragments for FA: a – a mixing grid with a deflector of the “swirl around the fuel element” type; b – with a deflector of the “run row by row” type

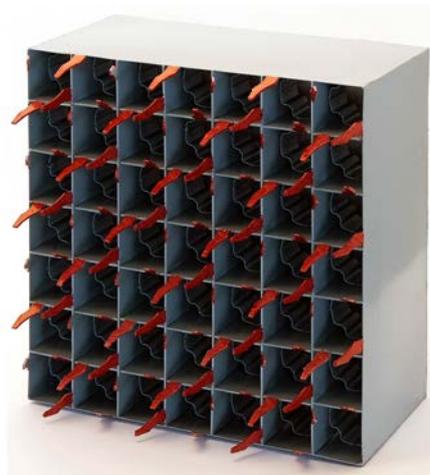


Рис. 2. Модель комбинированной перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-КВАДРАТ

Fig. 2. A model of the FA-KVADRAT combined mixing spacer grid

Особенностями чехловой кассеты реактора КЛТ-40С являются замена традиционных направляющих каналов органов регулирования на центральный шестигранный вытеснитель и применение пластинчатой ДР (рис. 3).

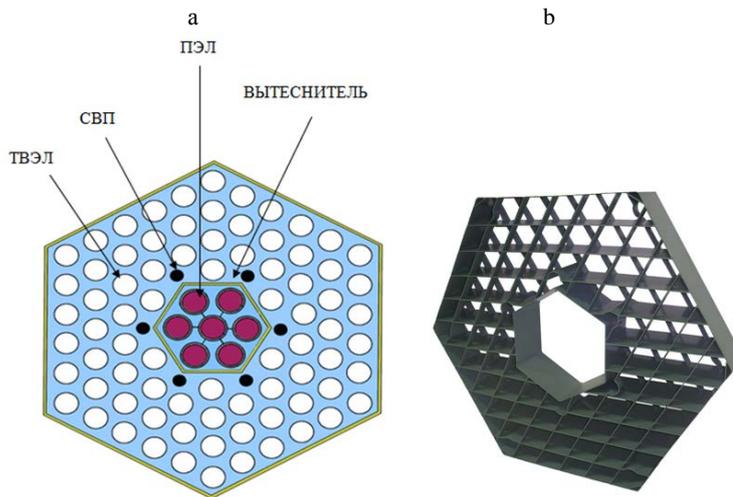


Рис. 3. Тепловыделяющие сборки для реакторных установок КЛТ-40С:  
а – поперечное сечение ТВС; б – пояс дистанционирующей решетки

Fig. 3. Fuel assemblies for the KLT-40C reactor unit:  
a – cross section of the FA; b – the spacer grid belt

Выбранная конструкция обеспечивает высокую жесткость, эксплуатационную надежность кассеты и ее соответствие всем требованиям, предъявляемым к современному ядерному топливу.

### Экспериментальное обоснование теплогидравлики активных зон

Обоснование теплотехнической надежности АЗ ядерных реакторов во многом базируется на теплогидравлическом расчете [3], что в свою очередь требует большой информативности и высокой достоверности используемых параметров и значений локальных характеристик. Таким образом, надежный теплогидравлический расчет требует проведения значительного объема экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в ТВС. Оценка влияния перемешивающих устройств на критические тепловые потоки, определяющие уровень теплотехнической надежности, возможна только на теплофизических стендах при натуральных условиях течения теплоносителя. Однако изучение гидродинамики ТВС и АЗ в целом целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах.

Для оценки влияния на поток теплоносителя различных типов решеток, устанавливаемых в вышеупомянутые реакторы, в базовой лаборатории реакторной гидродинамики Нижегородского государственного технического университет имени Р. Е. Алексеева (НГТУ) создан экспериментальный стенд, представляющий собой аэродинамический контур, через который прокачивается воздух (рис. 4).

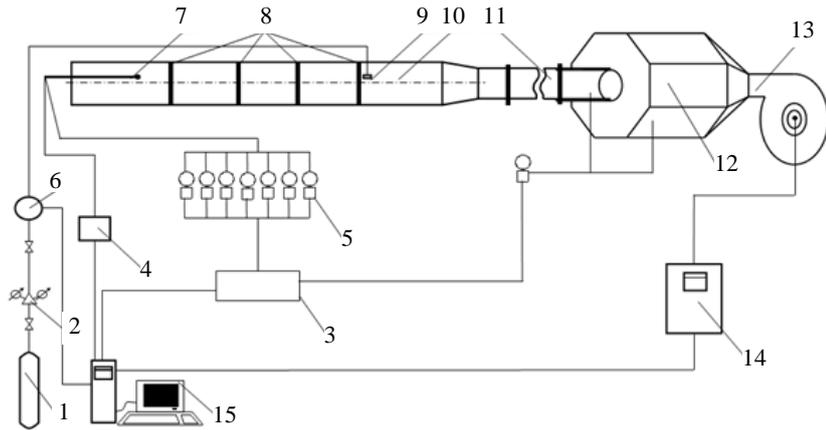


Рис. 4. Экспериментальный стенд НГТУ: 1 – газовый баллон; 2 – редуктор; 3 – базовый блок коммутации/измерения; 4 – модульный газоанализатор; 5 – преобразователи давления; 6 – регулятор расхода газа; 7 – отборный зонд; 8 – статические отборы; 9 – устройство ввода трассера в ячейку экспериментальной модели; 10 – экспериментальная модель; 11 – успокоительный участок; 12 – ресиверная емкость; 13 – вентилятор высокого давления; 14 – преобразователь частоты; 15 – ЭВМ

Fig. 4. The NSTU experimental test rig: 1 – gas cylinder; 2 – reducer; 3 – basic switching/measurement unit; 4 – modular gas analyzer; 5 – pressure transmitters; 6 – gas flow rate controller; 7 – selective probe; 8 – static selections; 9 – input of a tracer into a cell experimental model; 10 – experimental model; 11 – flow stabilization area; 12 – receiving reservoir; 13 – high-pressure fan; 14 – frequency converter; 15 – computer

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока в экспериментальных моделях (ЭМ) ТВС проводили методом трассера. Принцип заключался в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступал в ресиверную емкость, двигался через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем, пройдя через ЭМ, выбрасывался в атмосферу. Газ-трассер подавался через впускной зонд (рис. 5а) в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка и также выбрасывался в атмосферу вместе с газозвдушной смесью. При помощи капилляров или трубки Пито, используемой в качестве отборного зонда и линии транспортировки пробы газа, за исследуемым поясом перемешивающей решетки производили замер концентрации трассера по длине и сечению ЭМ (рис. 5).

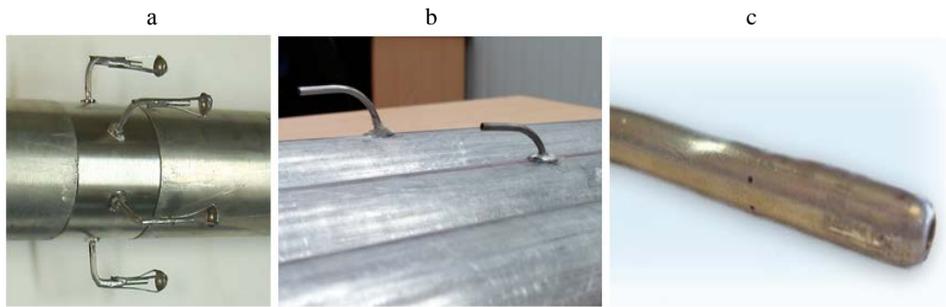


Рис. 5. Оснастка для проведения экспериментов по массообмену:  
 а – впускные насадки; б – отборные капилляры; с – трубка Пито

Fig. 5. Equipment for carrying out experiments on mass exchange:  
 a – intake nozzles; б – selecting capillaries; с – Pitot tube

Измерение полей скорости в ЭМ производили при помощи пневмометрического пятиканального зонда. Данным зондом (рис. 6) измеряли полный вектор скорости в точке по трем его компонентам путем измерения давлений в отверстиях чувствительной головки зонда и последующего пересчета по определенному алгоритму.

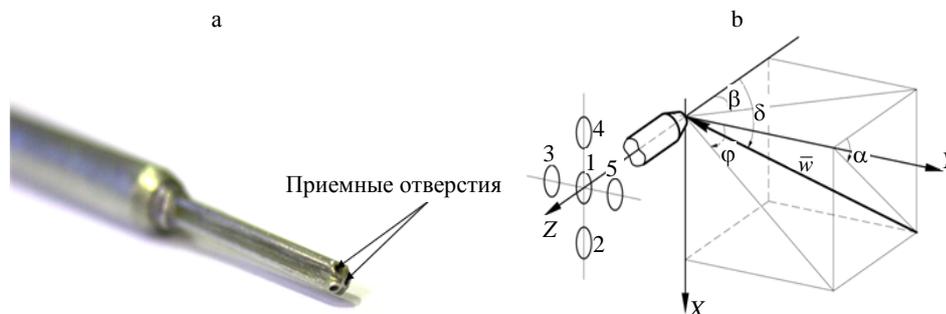


Рис. 6. Пневмометрический зонд (чувствительная часть):

а – внешний вид головки зонда; б – схема измерения компонент скорости

Fig. 6. Pneumometric probe (its sensitive part):

а – exterior view probe head; б – measurement diagram of the velocity component

Соответствие исследуемых процессов натурным основано на теории гидродинамического подобия, согласно которой модельные процессы подобны натурным при условии соблюдения определяющих критериев подобия. Для турбулентных течений в ограниченных затесненных каналах (каким и является течение в ТВС PWR) определяющим критерием является число Рейнольдса. Проведение экспериментальных исследований при числах  $Re$ , соответствующих режиму течения в штатных ТВС реактора, достаточно затруднительно, так как числа  $Re$  велики и достигают порядка 500000. Однако в соответствии с теорией подобия в зоне автомодельного течения форма безразмерных полей скорости  $w_{лок}/\bar{w}$  остается практически неизменной на протяжении всей зоны автомодельности [4]. Таким образом, исследования, проведенные в зоне автомодельности течения, по-

зволяют в дальнейшем пересчитывать результаты на условия течения в натуральных сборках. На аэродинамическом стенде были также определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) всех исследуемых решеток. Соответствие КГС решеток в модельном эксперименте натурным значениям, а также проведение экспериментов на выполнение баланса расходов сред подтверждают представительность получаемых данных. Погрешности измерения концентрации газа-трассера не превышали 1,5 %, подача газа обеспечивалась редуктором с отклонениями 0,5 % массового расхода. Измерение давлений в каналах пневмометрических зондов осуществляли при помощи преобразователей избыточного давления с пределом допускаемой основной погрешности 0,25 %, погрешность получаемых проекций скорости не превышала 7,0 % ее абсолютного значения.

### Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВСА

Исследования локальных характеристик потока в ТВСА проводили на различных стержневых экспериментальных моделях, представляющих собой масштабные копии фрагментов активной зоны и сегментов кассет (рис. 7) [5–8]. 57-я и 94-я стержневые модели имитируют область АЗ на стыке соседних ТВС реакторов ВВЭР и ВБЭР, что дает возможность исследования межкассетных взаимодействий в потоке.

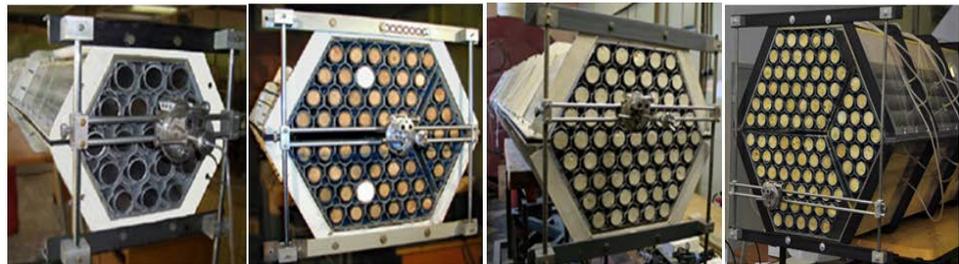


Рис. 7. Экспериментальные модели ТВСА

Fig. 7. FA experimental model

В ходе исследований определяли оптимальную конфигурацию установки ПР типа «порядная прогонка» и «закрутка вокруг твэла». По результатам комплексных исследований сделаны следующие выводы:

- экспериментально определены расходы через характерные ячейки модели;
- наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного конвективного движения потока по направлению отгиба соответствующих дефлекторов и, как следствие, к появлению поперечных, постепенно затухающих составляющих скорости;
- изменение концентрации трассера в ячейках показывает, что не весь поток теплоносителя движется по направлению расположения дефлекторов. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока;

- определены длины затуханий возмущений массообменных процессов за ПР ( $l/d \approx 14-16$ ,  $d$  – гидравлический диаметр модели);
- при последовательной постановке двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации трассера в поперечном сечении экспериментальной модели по сравнению с одной ПР типа «порядная прогонка» или ПР типа «закрутка вокруг твэла».

### Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВС-КВАДРАТ

Исследования в обоснование конструкций топлива ТВС-КВАДРАТ для зарубежных PWR проводили на 49-стержневой модели (рис. 8а) с установленными имитаторами НК и пластинчатых дистанционирующих решеток (ПДР) [8, 9]. Выбор оптимальной конструкции указанных ПДР осуществляли при различных вариантах типа дефлектора и угла его отгиба (рис. 8б).

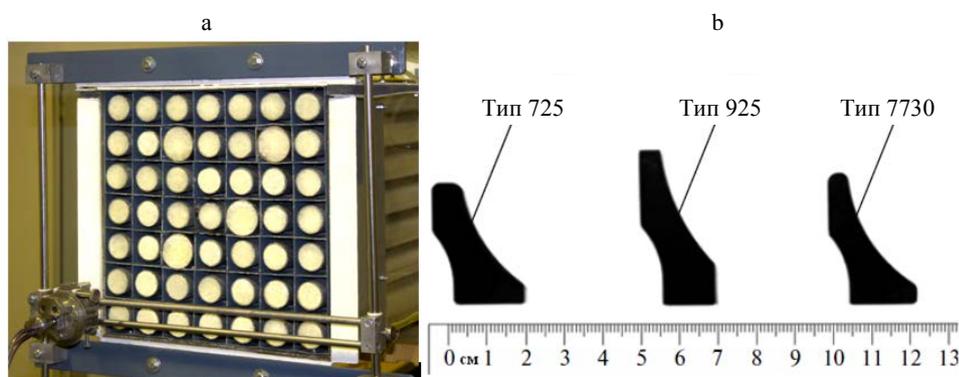


Рис. 8. Экспериментальная модель ТВС-КВАДРАТ: а – общий вид выхода модели; б – исследованные типы дефлекторов пластинчатых дистанционирующих решеток

Fig. 8. FA-KVADRAT experimental model: а – general view of the output of the model; б – examined types of plate spacer grid deflectors

Для количественной и качественной оценки закономерностей течения и влияния ПДР на поток теплоносителя строили графики изменения относительных скоростей потока по длине модели, графики и картограммы распределения газа-трассера. По результатам исследований установлено следующее:

- экспериментально установлено распределение расходов по характерным ячейкам ТВС, в том числе в области направляющих каналов;
- определены КГС ПДР различной конфигурации, оценена эффективность перемешивания теплоносителя при установке данных ПДР;
- установлено, что наилучшими (с точки зрения соотношения интенсивности перемешивания и гидравлического сопротивления) являются дефлекторы типа 925;
- наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного движения потока (со скоростью, не превышающей 30 % расходной);

- затухание массообменных процессов происходит на расстояниях  $25-27d_t$  за ПДР;
- эффективный коэффициент межъячейкового массообмена при установке выбранной ПДР в 5 раз больше, чем в гладком пучке твэл.

### Результаты исследований течения в моделях тепловыделяющих сборок КЛТ-40С

Необходимость проведения детальных теплогидравлических расчетов в обоснование теплотехнической надежности ТВС для РУ КЛТ-40С обусловила постановку ряда экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена [10–12]. Эксперименты проводили с использованием 18- и 84-стержневых моделей ТВС КЛТ-40С (рис. 9). Вследствие сложной геометрии пластинчатой ДР, в ТВС присутствуют 14 различных по затеснению проходного сечения типов ячеек, что создает существенную неравномерность расходов и коэффициентов межъячейкового массообмена.

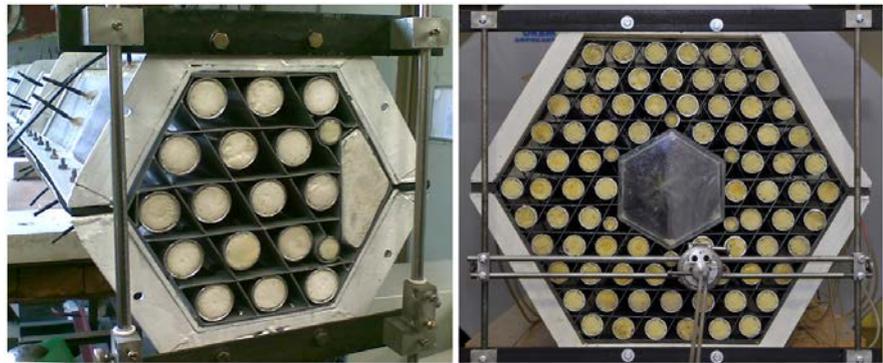


Рис. 9. Модели тепловыделяющих сборок КЛТ-40С

Fig. 9. FA KLT-40C experimental models

Для получения полной информации о трехмерном течении потока исследования проводили в трех характерных областях: стандартной (преимущественная часть ячеек) области вытеснителя и периферийной области (рис. 10). В результате обработки экспериментальных данных выявлены следующие особенности течения теплоносителя:

- во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей ( $W_x/\bar{W}$ ), ( $W_y/\bar{W}$ ) не превышают 5 %;
- в стандартных ячейках области вытеснителя, где пластины ДР располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя на 10 % больше, чем через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «звезды» (рис. 11);
- в стандартных ячейках периферийной области через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя

на 20 % больше, чем через ячейки, где пластины ДР располагаются в виде «звезды»;

- через ячейки области вытеснителя и периферийной области расход теплоносителя на (30–50) % меньше, чем через стандартные ячейки ТВС реактора КЛТ-40С.

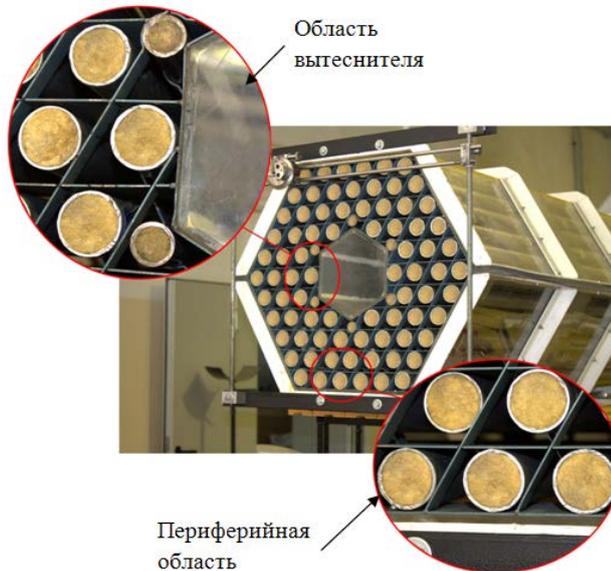


Рис. 10. Исследуемые области модели

Fig. 10. Model areas under investigation

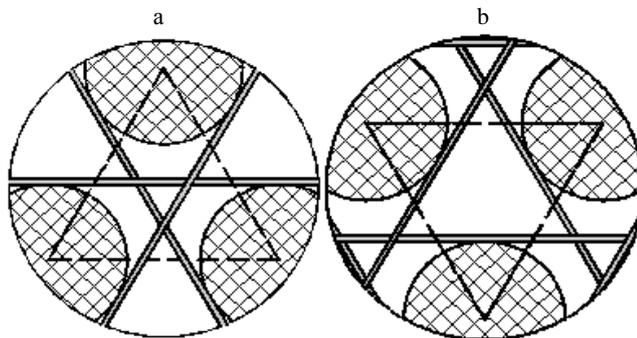


Рис. 11. Стандартные ячейки тепловыделяющих сборок:  
а – тип затеснения «звезда»; б – тип затеснения «треугольник»

Fig. 11. Standard cells of fuel assemblies:  
a – the “star” type of compressing; b – the “delta” of compressing

### ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных работ выявлены основные закономерности течения в топливных сборках различных конструкций. На основе исследований массообменных характеристик создан расчетный алгоритм, заложенный в программу для ЭВМ. Данная программа позволяет оценивать распределения концентрации, используя экспериментально получен-

ные поля скоростей. Анализ результатов работы программы показал, что предельные отклонения расчетных концентраций от экспериментальных составляет не более 10 %. Результаты расчетов были использованы для вычисления коэффициентов массообмена между определенными ячейками модели тепловыделяющих сборок КЛТ-40С, а также эффективного коэффициента перемешивания перемешивающих решеток для ТВСА реакторов ВВЭР-300, используемых при инженерных расчетах активной зоны в качестве замыкающих соотношений.

2. Накопленная база данных по течению теплоносителя в тепловыделяющих сборках для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкции активной зоны. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов перемешивающих решеток учитывались конструкторами ОАО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию тепловыделяющих сборок. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании технической надежности\*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С. М. Дмитриев [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2014. № 2. С. 98–108.
2. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение, 2013. 415 с.
3. Жуков, А. В. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса / А. В. Жуков, А. П. Сорокин, Н. М. Матюхин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 130 с.
4. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. перераб. и доп. / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.
5. Бородин, С. С. Особенности гидродинамики теплоносителя в альтернативных ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток / С. С. Бородин, С. М. Дмитриев // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 4. С. 70–76.
6. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 252–257.
7. Исследования массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С. С. Бородин [и др.] // Труды Пятой Рос. нац. конф. по теплообмену: в 8 т. М.: Издат. дом МЭИ, 2010. Т. 1. С. 177–180.
8. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С. С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 3. С. 98–107.
9. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR с перемешивающими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27.
10. Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С / А. В. Варенцов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2012. № 1. С. 107–113.

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора от 3 декабря 2014 г. № 02.G25.31.0124 (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

11. Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока в тепловыделяющих сборках реакторной установки плавучей атомной электростанции / А. В. Варенцов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2012. № 3. С. 118–125.
12. Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С / А. В. Варенцов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 114–119.

Поступила 12.04.2016 Подписана в печать 10.06.2016 Опубликована онлайн 29.11.2016

#### REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Barinov A. A., Borodina V. E., Khrobostov A. E. (2014) Towards the Methodology of Thermotechnical Reliability of Active Zones of Water Power Reactors. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (2), 98–108 (in Russian).
2. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Iu. K., Sorokin N. M. (2013) *Basic Equipment of a Shell-Type Thermal Neutron Reactor Nuclear Power Plant*. Moscow, Mashinostroyeniye. 415 (in Russian).
3. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Matyukhin N. M. (1989) *Interchannel Exchange in Fuel Assemblies of Fast Reactors: Theoretical Fundamentals and the Physics*. Moscow, Energoatomizdat. 130 (in Russian).
4. Gukhman A. A. (1973) *Introduction into the Theory of Similarity*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 296 (in Russian).
5. Borodin S. S., Dmitriev S. M. (2006) Specific Features of Hydrodynamics of the Coolant in Alternative Fuel Assemblies of the VVER-1000 Reactors by Using of Mixing Grids. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika* [Nuclear Power Production. Proceedings of Higher Educational Institutions], (4), 70–76 (in Russian).
6. Dmitriev S. M., Borodin S. S., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2012) Experimental Studies of Hydrodynamic and Mass-Transfer Properties of Coolant Flow in VVER Fuel Assemblies TVSA. *Atomic Energy*, 113 (5), 252–257. DOI: 10.1007/s10512-013-9638-6.
7. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Novikova O. Iu., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2010) Study of the Mass Transfer Characteristics and Efficiency of Mixing Grids of FA-ALFA of VVER Reactors. *Trudy Piatoi Ros. Nats. Konf. po Teploobmenu*. T. 1 [Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Exchange. Vol. 1]. Moscow, Publishing House MEI, 177–180 (in Russian).
8. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2013) Specific Features of Local Hydrodynamics and Mass Exchange Processes of Coolant in Fuel Assemblies of VVER and PWR Reactors with Mixing Grids. *Teplovyte Protssy v Tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 5 (3), 98–107 (in Russian).
9. Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Sorokin V. D., Samoilov O. B. (2014) Combined Numerical and Experimental Investigations of Local Hydrodynamics and Coolant Flow Mass Transfer in Kvadrat-Type Fuel Assemblies of PWR Reactors with Mixing Grids. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 61 (8), 558–565. DOI: 10.1134/S0040363614080050.
10. Varentsov A. V., Doronkov D. V., Kupricheva E. S., Solntsev D. N., Sorokin V. D. (2012) Investigation of Local Mass Transfer and Efficiency of Spacer Grids of Fuel Assembly of Reactors KLT-40С. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (1), 107–113 (in Russian).
11. Varentsov A. V., Ziablitshev D. V., Solntsev D. N., Pronin A. N., Morozkin O. N. (2012) Experimental Study of Local Hydrodynamic Characteristics of the Flow in Fuel Assemblies of the Reactor Installation of Floating Nuclear Power Plant. *Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev], (3), 118–125 (in Russian).
12. Varentsov A. V., Dmitriev S. M., Dobrov A. A., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2013) Experimental and Numerical Researches of Hydrodynamics and Mass Transfer of Coolant Flow in Experimental Model of KLT-40C Reactor Fuel Assembly. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], (3), 114–119 (in Russian).

Received: 12 April 2016 Accepted: 10 June 2016 Published online: 29 November 2016

## ЮБИЛЕИ

### Кафедре «Электрические станции» БНТУ – 70 лет

Министерством высшего и среднего образования СССР 12 февраля 1946 г. был издан приказ об открытии в Белорусском политехническом институте (БПИ) энергетического факультета. На факультете началась подготовка инженеров-электриков по специальности «Электрические станции, сети и системы». С этого момента на протяжении уже 70 лет ведет свою историю кафедра «Электрические станции» (до 1963 г. она называлась «Электрические станции, сети и системы»).

Первым заведующим кафедрой стал известный ученый, заслуженный деятель науки и техники БССР, кандидат технических наук, профессор А. И. Руцкий. Он же был избран деканом энергетического факультета. Александр Иванович Руцкий возглавлял кафедру в течение 25 лет – с 1946 по 1971 г. Данная кафедра стала родоначальницей других кафедр электроэнергетического направления: в 1963 г. образовалась новая кафедра «Электрические системы», отвечающая за подготовку инженеров-электриков по специальности «Электроэнергетические системы и сети»; в 1970-м – кафедра «Электроснабжение». С 1963 г. кафедра «Электрические станции» готовит специалистов по такой же специальности.

В 1971–1973 гг. кафедрой руководил кандидат технических наук, доцент Е. Н. Загорский, в 1973–1989 гг. – доктор технических наук, профессор В. И. Новаш; в 1989–1999 гг. – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси М. И. Стрелюк. В 1999–2001 гг. исполнял обязанности заведующего кафедрой кандидат технических наук, доцент Л. Н. Свита. Доктор технических наук, профессор И. И. Сергей возглавлял кафедру в 2001–2016 гг. С июня 2016 г. кафедрой руководит ее выпускник 1980 г. кандидат технических наук, доцент И. В. Новаш.

Первыми преподавателями на кафедре работали кандидат технических наук В. В. Мотовилов, кандидат технических наук, доцент Н. А. Тиняков, кандидат технических наук, доцент Я. Ю. Слепян, Е. Н. Кавцевич, С. С. Речин. Для чтения лекций по специальным дисциплинам привлекались крупные ученые Москвы и Ленинграда, а выполнять лабораторные работы по курсу «Техника высоких напряжений» студенты уезжали в Ленинградский электротехнический институт.

Начиная с 1950 г. научный коллектив формировался из талантливых выпускников кафедры, среди которых были Е. Н. Загорский, В. И. Новаш, Ю. Г. Румянцев, В. К. Куцьло, В. С. Каханович, Н. И. Тюшкевич, Л. Л. Червинский, А. С. Красько, С. М. Силюк, М. И. Стрелюк, А. Н. Герасимович, В. А. Пашкевич, С. Е. Рулько, Л. Н. Свита, А. А. Тишечкин, В. Н. Мазуркевич, Н. Н. Бобко, Е. В. Глинский, В. М. Абраменко, И. А. Прима. Все они принимали активное участие в создании лабораторной базы кафедры. С их участием по мере развития факультета формировались другие кафедры.

А. И. Руцким и его соратниками заложены учебно-методические и научные основы специальности «Электрические станции». Разработанные в те годы практически с нуля типовые и рабочие учебные планы и программы, учебники и учебные пособия и сегодня не утратили своей ценности для учебного процесса.

Научные исследования, проводимые под руководством А. И. Руцкого, в области расчета электромагнитных процессов в цепях со сталью, их влияние на динамиче-

скую и термическую стойкость токоведущих конструкций электроустановок актуальны и в настоящее время. В дальнейшем вопросы этого научного направления были продолжены и развиты его учениками – кандидатами технических наук, доцентами Е. Н. Загоровским, Ю. Г. Румянцевым, В. Н. Мазуркевичем, Э. А. Скварко, В. А. Булатом, А. Г. Губановичем. Наибольший вклад в развитие творческого наследия А. И. Руцкого внесли доктор технических наук, профессор А. Н. Герасимович, И. И. Сергей, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь М. И. Стрелюк.

Одновременно на кафедре проводились научные исследования по математическому моделированию устройств релейной защиты и автоматики, которые возглавлял один из первых выпускников кафедры 1950 г., целевой аспирант Ленинградского политехнического института В. И. Новаш. Накопленный доктором технических наук, профессором, заслуженным деятелем науки Республики Беларусь Владимиром Ивановичем Новашем и его учениками – доктором технических наук, профессором, членом-корреспондентом НАН Беларуси Ф. А. Романюком, кандидатами технических наук, доцентами А. А. Тишечкиным и В. Ю. Румянцевым, доцентом Н. Н. Бобко, старшим преподавателем Е. В. Глинским – учебно-методический и научный потенциал позволил открыть на кафедре сначала специализацию «Автоматизация и релейная защита электроустановок» по специальности «Автоматизация и управление энергетическими процессами», а в 2012 г. – новую специальность «Релейная защита и автоматика».

В результате реорганизации энергетического факультета в 1994 г. кадровый состав кафедры пополнился преподавателями кафедры «Техника высоких напряжений» – доктором технических наук, профессором К. Ф. Степанчуком, кандидатами технических наук, доцентами А. С. Красько и С. П. Ржевской, а учебно-материальная база расширилась за счет лаборатории «Техника высоких напряжений». На кафедре появилось научное направление, связанное с высоковольтными испытаниями изоляционных конструкций электрических машин и аппаратов, которое возглавил выпускник кафедры 1956 г. К. Ф. Степанчук.

В дальнейшем на кафедре сформировались два основных научных направления, которые в настоящее время трансформировались в две научные школы – «Электродинамическая стойкость и аэродинамическая стабильность токоведущих конструкций с гибкими проводниками» (основоположник – профессор А. И. Руцкий, руководитель – профессор И. И. Сергей) и «Информационное и математическое обеспечение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем» (основоположник – профессор В. И. Новаш, руководитель – профессор Ф. А. Романюк). В рамках научных школ выполняются государственные программы научных исследований, хозяйственные договоры по заявкам производства, ведется подготовка кадров высшей научной квалификации, поддерживаются связи с зарубежными вузами и организациями.

Опыт и педагогическое мастерство преподавателей востребованы не только в Республике Беларусь, но и за ее пределами. Сами преподаватели повышали свою квалификацию в известных зарубежных учебных заведениях. Так, профессор В. И. Новаш в 1965 г. находился на научной стажировке во Франции по линии ЮНЕСКО. Доцент Е. Н. Загоровский преподавал электрические дисциплины в Рангунском техническом университете (Бирма). Профессор К. Ф. Степанчук стажировался в течение 1970 г. по научной тематике в Манчестерском техническом университете (Англия). Доцент А. Г. Губанович в 1983–1987 гг. преподавал электротехнические дисциплины в Техническом университете г. Ботна (Алжир). Доцент В. А. Булат в 1986–1987 гг. выезжал в Камагуэйский технический универси-

тет (Куба) для преподавания специальных электротехнических дисциплин. Профессор И. И. Сергей проводил совместные научные исследования с учеными Кореянского электротехнологического научно-исследовательского института (Южная Корея) с 1995 по 2002 г. В настоящее время профессор Ф. А. Романюк поддерживает научные связи с Техническим университетом г. Люблина (Польша).

Кафедра «Электрические станции» характеризуется сильным профессорско-преподавательским составом: два доктора технических наук, профессора – И. И. Сергей и член-корреспондент НАН Беларуси Ф. А. Романюк; опытные кандидаты технических наук, доценты В. А. Булат, А. Г. Губанович, И. В. Новаш, Е. Г. Пономаренко, В. Ю. Румянцев, С. М. Силюк, Е. А. Дерюгина, доцент Н. Н. Бобко, кандидат технических наук Е. В. Булойчик, старшие преподаватели О. А. Гурьянчик, П. И. Климкович, Л. В. Тетерина, А. Г. Сапожникова, Я. В. Потапиц, К. И. Артеменко, ассистенты Ю. В. Гавриелок, А. К. Климентинонок.

Преподаватели кафедры «Электрические станции» не только проводят учебные занятия и выполняют научные исследования, но и занимают различные руководящие должности. Так, Е. Г. Пономаренко с 2014 г. является заместителем декана энергетического факультета по общим вопросам и учебной работе. С 2007 по 2014 г. в этой должности работал И. В. Новаш, а деканом факультета с 1987 по 2014 г. на протяжении более четверти века работал С. М. Силюк. В. Ю. Румянцев – заместитель декана энергетического факультета по научной работе, В. А. Булат – по учебной работе со студентами 4–6 курсов заочного отделения. Ф. А. Романюк является главным редактором журнала «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ», а с 2001 по 2016 г. работал в должности проректора по научной и инновационной работе БНТУ.

Учебные занятия со студентами проводятся в нескольких учебных лабораториях: техники высоких напряжений; электромагнитных переходных процессов; электрической части электростанций; микроэлектронных устройств; управления, контроля и защиты электроэнергетических установок; релейной защиты и автоматики. Заведует лабораториями Т. А. Ивлева-Шишкова. В проведении лабораторных занятий помогают ведущий инженер-электрик И. И. Свитлык; инженеры 1-й категории Е. П. Шнейдер и В. К. Гребенник; инженер В. Н. Василевский; техники 1-й категории И. М. Кузьмицкая и А. С. Василевская.

Материальная база лабораторий кафедры формировалась с момента ее образования. Нельзя не вспомнить грамотных и талантливых инженеров, руками которых создавались первые лабораторные установки, – А. Ф. Лятоху, Н. Ф. Орлова, В. И. Бурдыкина, В. П. Петрова, А. И. Кузнецова. Длительный период времени работали бессменный секретарь кафедры В. К. Коваленко, инженеры А. А. Защеринский, Ф. А. Козлов, И. Н. Маныкин, Ю. Крупенин.

В лаборатории техники высоких напряжений занимаются студенты не только кафедры «Электрические станции», но и кафедр «Электроснабжение» и «Электрические системы». В 2001 г. лаборатории техники высоких напряжений было присвоено имя лауреата Нобелевской премии по физике Жореса Ивановича Алферова – известного российского ученого, работающего в области создания гетерогенных полупроводниковых устройств, в которой он обучался на 1-м курсе БПИ. Эта уникальная высоковольтная лаборатория оборудована генератором импульсных напряжений 750 кВ. Он используется для проведения фундаментальных научных исследований и учебных занятий. В лабораториях электрических станций и релейной защиты установлены образцы современного инновационного оборудования как зарубежного, так и отечественного производства.

Студентов, обучающихся по специальности «Электрические станции», готовят для работы на базовых предприятиях энергетики, производящих электроэнергию, от работы которых зависит электроснабжение промышленных и сельскохозяйственных комплексов Республики Беларусь, а также бытового сектора. Они получают

знания и навыки, необходимые для осуществления управленческой, организационной, проектной, научно-исследовательской и преподавательской деятельности.

Инженер-энергетик, получивший образование на кафедре, способен принимать участие в эксплуатации, монтаже и наладке электрической части существующих, вновь сооружаемых и реконструируемых электростанций и подстанций. Дипломированный инженер может работать в организациях по ремонту, наладке и испытаниям электрооборудования станций, в службе изоляции и защиты от перенапряжений электрических сетей, в проектных и научно-исследовательских институтах. Спектр должностей выпускников кафедры включает рядовых инженеров, руководителей цехов и электростанций и даже всей энергетической отрасли государства.

Специальность «Релейная защита и автоматика» имеет направленность в области систем автоматики и релейной защиты электроэнергетического оборудования. Инженеры-электрики, получившие эту специальность, работают в области эксплуатации, монтажа, ремонта, наладки, подготовки кадров, разработки устройств автоматизации, контроля и защиты электроэнергетических систем, установок и оборудования в различных отраслях народного хозяйства. Они занимают инженерные и руководящие должности на производстве, в монтажных, ремонтно-наладочных, проектных и научно-исследовательских энергетических организациях, высших и средних специальных учебных заведениях.

О популярности специальностей, по которым готовятся специалисты на кафедре, можно судить по итогам приема студентов в 2016 г. (табл. 1, 2).

Таблица 1

**Результаты приема на дневное отделение 2016 г.**

Специальность	Обучение за счет средств республиканского бюджета		Обучение на условиях оплаты	
	План приема	Проходной балл	План приема	Проходной балл
I 43 01 01 «Электрические станции»	30	258	8	113
I 43 01 09 «Релейная защита и автоматика»	24	234	–	–

Таблица 2

**Результаты приема на заочное отделение 2016 г.**

Специальность	Обучение за счет средств республиканского бюджета		Обучение на условиях оплаты	
	План приема	Проходной балл	План приема	Проходной балл
I 43 01 01 «Электрические станции»	10	148	10	133

Кафедра растит молодое поколение ученых. Через ее аспирантуру по специальности «Электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими» успешно прошло более 110 инженеров. Всего за время существования кафедры подготовлено свыше 60 кандидатов и семи докторов технических наук (из них 14 кандидатов работают в энергетической отрасли республики). Ученые кафедры составляют основу Совета Д.02.05.02 по защите диссертаций при БНТУ (Ф. А. Романюк, председатель Совета; И. И. Сергей). При кафедре функционирует магистратура очной и заочной форм обучения. Для магистрантов и аспирантов созданы все условия для успешного выполнения научных исследований и написания магистерских и кандидатских диссертаций.

Помощь в оснащении учебно-материальной базы оказывает филиал кафедры, который создан на РУП «Белэлектромонтажналадка», и другие структурные подразделения ГПО «Белэнерго». На них студенты старших курсов проходят производственную практику, как правило, на рабочих местах, что позволяет не только

изучить современную инновационную технику производства и распределения энергии, но и получить добавку к стипендии.

За годы существования кафедры для нужд бывшего СССР и Республики Беларусь подготовлено более 3000 инженеров-электриков, которые в настоящее время составляют основу кадрового потенциала энергетики страны. Научные труды преподавателей кафедры А. И. Рущкого, В. И. Новаша, М. И. Стрелюка, К. Ф. Степанчука, А. Н. Герасимовича, Ф. А. Романюка, И. И. Сергея и других внесли свой вклад в решение актуальных проблем энергосистемы Беларуси.

О творческих взаимодействиях коллектива старейшей кафедры с производственными предприятиями энергетики, сложности решаемых научных задач и об отношении руководства энергетических предприятий к результатам научных изысканий рассказывает член-корреспондент НАН Беларуси Ф. А. Романюк: «В 80-е гг. прошлого столетия на кафедре электрических станций БПИ группой исследователей из числа научных работников и профессорско-преподавательского состава под руководством профессора В. И. Новаша активно велось исследование по разработке цифровых устройств релейной защиты и автоматики. Это было началом нового научного направления, вызывающего огромный интерес не только в научных кругах, но и среди производственников.

По заказу “Белэнерго” на кафедре осуществлялись работы по созданию цифровых защит синхронного генератора от замыканий на землю в обмотке статора и от перегрузки обмотки ротора током возбуждения. Напряженная работа закончилась успешно, и в середине 1982 г. впервые в СССР был создан опытный действующий образец цифровой защиты генератора на базе одноплатной отечественной микро-ЭВМ “Электроника С5”. Основные технические решения этой разработки защищены тремя авторскими свидетельствами на изобретения. Опытный образец защиты установлен в эксплуатацию на генераторе 300 МВт Лукомльской ГРЭС с действием на сигнал. Расширенные функциональные возможности цифровой защиты позволяли оперативно визуально контролировать сопротивление обмотки статора по отношению к земле и температуру обмотки ротора. Это весьма положительно воспринималось эксплуатационным персоналом ГРЭС.

По заказу Котласского ЦКБ в 1984 г. начались исследования по разработке цифрового автоматического синхронизатора, которые были успешно завершены к середине 1986 г. Созданный промышленный образец цифрового синхронизатора был установлен в эксплуатацию на ТЭЦ-1 энергосистемы Котласского ЦКБ в том же году. Положенные в основу данной разработки идеи защищены двумя авторскими свидетельствами на изобретения. Процедура его промышленных испытаний и ввода в эксплуатацию для того времени была уникальной. Вначале опробовалась работа цифрового синхронизатора при включении генератора на параллельную работу с энергосистемой при отключенном разъединителе. Когда персонал убедился, что синхронизатор функционирует правильно, приняли незамедлительное решение об автоматическом включении генератора “по полной схеме”. Когда и эта операция завершилась успешно, было принято решение о вводе цифрового автоматического синхронизатора в эксплуатацию. Оперативность и смелость руководства и энергетиков Котласского ЦКБ заслуживали внимания и уважения.

В настоящее время предприятиями энергетической отрасли разрабатываются и выпускаются микропроцессорные защиты электроэнергетических объектов, в которых используются результаты научных исследований кафедры».

Выпускники кафедры занимали и занимают высокие должности в электроэнергетике: министра энергетики, руководителей и главных инженеров «Белэнерго», РУП-облэнерго, электростанций, филиалов «Электрические сети», «Энергонадзор», предприятий строительного-монтажного комплекса Белорусской энергосистемы, а также главных энергетиков крупных промышленных предприятий.

Поздравляем всех сотрудников, студентов, магистрантов, аспирантов и выпускников кафедры «Электрические станции» БНТУ с семидесятилетием.

## НЕКРОЛОГ

### Профессор СТЕПАНЧУК Климентий Филиппович



16 ноября 2016 г. ушел из жизни ученый, педагог, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические станции» К. Ф. Степанчук.

Климентий Филиппович родился 25 октября 1932 г. в г. Минске. В 1956 г. окончил Белорусский политехнический институт. Работал на Сталинградском металлургическом заводе «Красный Октябрь» сменным инженером, начальником электротехнического сектора конструкторского бюро (1956–1961).

В 1962 г. К. Ф. Степанчук поступил в аспирантуру Белорусского политехнического института, закончив ее, защитил кандидатскую диссертацию. С 1964 г. работал ассистентом, старшим преподавателем, доцентом кафедры «Техника высоких напряжений». С сентября 1969-го по июль 1970 г. проходил научную стажировку в Англии. После стажировки с 1987 г. работал доцентом кафедры «Теоретические основы электротехники». В 1994 г. защитил докторскую диссертацию и был переведен на должность профессора кафедры «Электрические станции», где и работал до 2006 г.

К. Ф. Степанчук был специалистом в области техники высоких напряжений и диагностики изоляции электрических машин и аппаратов. Он – автор более 100 научных статей, 15 учебных пособий, одной монографии и двух учебников по курсу «Техника высоких напряжений». Основные его научные работы относятся к вопросам расчета, конструирования и эксплуатации высоковольтной изоляции машин и аппаратов, контроля и диагностики электрической изоляции, экологическим проблемам высоковольтной техники.

За достижение высоких показателей в труде, большой вклад в развитие и совершенствование энергетической отрасли республики К. Ф. Степанчук награждался грамотами БНТУ, медалью «Ветеран труда», почетным знаком «Ветеран энергетики» и юбилейным знаком концерна «Белэнерго» «70 лет Белорусской энергосистеме».

Светлая память о Климентии Филипповиче навсегда останется в сердцах его коллег, единомышленников, учеников.

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА»  
в 2016 г.**

**I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

**1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ**

**а) Автоматизация и релейная защита**

- Румянцев Ю. В.** Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора . . . . . 3
- Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Новаш И. В.** Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты . . . . . 5

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И СЕТИ**

**а) Электрическая часть электростанций и подстанций**

- Мустафаев Р. И., Гасанова Л. Г., Мусаев М. М.** Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами . . . . . 2

**б) Электрические сети и линии электропередачи**

- Гашимов А. М., Рахманов Н. Р., Гулиев Г. Б., Рахманов Р. Н., Мустафаев А. А.** Вероятностное потокораспределение как реакция на стохастичность нагрузки в энергосистеме . . . . . 6
- Гулиев Г. Б.** Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой . . . . . 4

**в) Техника высоких напряжений**

- Гашимов А. М., Гурбанов Э. Д.** Разработка высоковольтных импульсных установок и обеспечение мер безопасности при их эксплуатации . . . . . 2
- Фурсанов М. И., Криксин П. В.** Влияние молнии на низковольтные системы высоковольтных электрических подстанций . . . . . 3

**г) Электроснабжение городов, промышленных предприятий  
и сельского хозяйства**

- Зализный Д. И.** Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев . . . . . 6
- Зализный Д. И., Широков О. Г., Широков Г. О., Капанский А. А.** Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора . . . . . 4
- Козловская В. Б., Калечиц В. Н.** Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием (Часть 1) . . . . . 6

<b>Маляр В. С., Маляр А. В.</b> Установившиеся режимы и статические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети . . . . .	6
<b>Радкевич В. Н., Михайлова Я. В.</b> Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей . . . . .	4
<b>Радкевич В. Н., Тарасова М. Н.</b> Оценка степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности . . . . .	1
<b>Ролик Ю. А., Горностай А. В.</b> Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой . . . . .	3
<b>Соленков В. В., Брель В. В.</b> Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе . . . . .	5
<b>Соленков В. В., Брель В. В.</b> Две конструкции встраиваемого в асинхронный двигатель электромеханического тормоза . . . . .	6
<b>Фираго Б. И., Александровский С. В.</b> Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода . . . . .	6
<b>Щербак Я. В., Семенов Ю. А.</b> Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока . . . . .	5

## 2. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

### а) Теоретические основы теплотехники

<b>Доброго К. В.</b> Решение задачи о распространении внутрипластового горения на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях . . . . .	4
<b>Захаревич А. Э.</b> Локальные значения параметров теплообмена на внутренних поверхностях ограждений . . . . .	1

### б) Тепловые электростанции. Теплоснабжение

<b>Романюк В. Н., Бобич А. А.</b> Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей . . . . .	4
<b>Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Фарзалиев Ю. З.</b> Оценка качества восстановления износа энергоблоков ТЭС . . . . .	1

### в) Котельные установки и водоподготовка

<b>Гламаздин П. М., Гламаздин Д. П., Ярмольчик Ю. П.</b> Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности . . . . .	3
<b>Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю.</b> Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций (Часть 1) . . . . .	3
<b>Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю.</b> Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций (Часть 2) . . . . .	4
<b>Штепа В. Н.</b> Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки . . . . .	5

### г) Промышленная теплоэнергетика

<b>Гусенцова Я. А., Гусенцова Е. С., Коваленко А. А.</b> Определение динамических характеристик промышленных объектов с помощью случайных воздействий . . . . .	2
<b>Романюк В. Н., Муслина Д. Б.</b> К вопросу рационального построения теплоэнергетической системы текстильных и трикотажных предприятий . . . . .	2
<b>Романюк В. Н., Муслина Д. Б.</b> О совершенствовании энергообеспечения аппаратов периодического крашения на предприятиях легкой промышленности . . . . .	1

## д) Тепло- и массообмен

<b>Bashstovoi V. G., Reks A. G., Klimovich S. V., Volkova O. Yu.</b> To Evaluation Test of Quality of Magnetic Fluids for Magnetofluid Devices ( <b>Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Климович С. В., Волкова О. Ю.</b> К оценке качества магнитных жидкостей для магнитожидкостных устройств) . . . . .	6
<b>Дмитриев С. М., Баринов А. А., Пронин А. Н., Сорокин В. Д., Хробостов А. Е.</b> Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением . . . . .	6
<b>Доброго К. В.</b> Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термодинамического воздействия на пласт . . . . .	2
<b>Карпов С. В., Загоскин А. А.</b> Конвективный теплообмен в циклонных рециркуляционных нагревательных устройствах . . . . .	4
<b>Сабуров Э. Н., Орехов А. Н., Онохин Д. А.</b> Конвективный теплообмен на боковой поверхности рабочего объема относительно длинной циклонной камеры . . . . .	6
<b>Сычевский В. А., Чорный А. Д., Баранова Т. А.</b> Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры . . . . .	3

## е) Энергетика, экология, энергосбережение

<b>Борухова Л. В., Шибeko А. С.</b> Совершенствование методики расчета теплопотуплений через светопрозрачные конструкции и рекомендации по их уменьшению . . . . .	1
<b>Dobrego K. V.</b> Effect of the Fill Ventilation Window on Performance of a Na-Tural Draft Cooling Tower Subjected to Cross-Winds ( <b>Доброго К. В.</b> Влияние вентиляционного отверстия в оросителе на тепловую работу башенной испарительной градирни в условиях ветра) . . . . .	5
<b>Купреев Е. И., Карницкий Н. Б.</b> Эффективность работы газоперекачивающих агрегатов . . . . .	4
<b>Лазарев В. С., Скалабан А. В.</b> Основные мировые научные журналы в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» . . . . .	5
<b>Осипов С. Н.</b> О повышении энергетической безопасности Беларуси . . . . .	5
<b>Осипов С. Н.</b> О реальной оценке энергоэффективности жизнеобеспечения жилых зданий при централизованной системе теплоснабжения . . . . .	3
<b>Сизов В. Д., Нестеров Л. В., Копко В. М.</b> Влияние отражательной способности экранов на процесс теплопередачи в ограждающих конструкциях . . . . .	1
<b>Хрусталеv Б. М., Пехота А. Н.</b> Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива . . . . .	2

## 3. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

<b>Ивашечкин В. В.</b> Расчет гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок . . . . .	1
<b>Ивашечкин В. В.</b> Совершенствование конструкций водозаборных скважин и методов их капитального ремонта . . . . .	2
<b>Капанский А. А.</b> Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки . . . . .	5

## 4. ЮБИЛЕИ

<b>К 100-летию со дня рождения.</b> Профессор Григорий Ефимович Поспелов . . . . .	4
<b>Кафедре «Электрические станции» БНТУ – 70 лет</b> . . . . .	6

## 5. НЕКРОЛОГ

<b>Профессор Степанчук Климентий Филиппович</b> . . . . .	6
---	---

**II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**

- А**  
Александровский С. В., 6
- Б**  
Баранова Т. А., 3  
Баринов А. А., 6  
Баштовой В. Г., 6  
Бобич А. А., 4  
Борухова Л. В., 1  
Брель В. В., 5, 6
- В**  
Волкова О. Ю., 6
- Г**  
Гасанова Л. Г., 2  
Гашимов А. М., 2, 6  
Гламаздин Д. П., 3  
Гламаздин П. М., 3  
Горностай А. В., 3  
Гулиев Г. Б., 4, 6  
Гурбанов Э. Д., 2  
Гусенцова Е. С., 2  
Гусенцова Я. А., 2
- Д**  
Дмитриев С. М., 6  
Доброго К. В., 2, 4, 5
- З**  
Загоскин А. А., 4  
Зализный Д. И., 4, 6  
Захаревич А. Э., 1  
Зенович-Лешкевич-Ольпинская А. Ю., 3, 4  
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., 3, 4
- И**  
Ивашечкин В. В., 1, 2
- К**  
Калечиц В. Н., 6  
Капанский А. А., 4, 5  
Карницкий Н. Б., 4  
Карпов С. В., 4  
Климович С. В., 6  
Коваленко А. А., 2  
Козловская В. Б., 6  
Копко В. М., 1  
Криксин П. В., 3  
Купреев Е. И., 4
- Л**  
Лазарев В. С., 5
- М**  
Маляр А. В., 6  
Маляр В. С., 6  
Михайлова Я. В., 4  
Мурадалиев А. З., 1  
Мусаев М. М., 2  
Муслина Д. Б., 1, 2  
Мустафаев А. А., 6  
Мустафаев Р. И., 2
- Н**  
Нестеров Л. В., 1  
Новаш И. В., 5
- О**  
Онохин Д. А., 6  
Орехов А. Н., 6  
Осипов С. Н., 3, 5
- П**  
Пехота А. Н., 2  
Пронин А. Н., 6
- Р**  
Радкевич В. Н., 1, 4  
Рахманов Н. Р., 6  
Рахманов Р. Н., 6  
Ролик Ю. А., 3  
Романюк В. Н., 1, 2, 4  
Романюк Ф. А., 5  
Рекс А. Г., 6

Румянцев В. Ю., 5  
Румянцев Ю. В., 3, 5

**С**

Сабуров Э. Н., 6  
Семенов Ю. А., 5  
Сизов В. Д., 1  
Скалабан А. В., 5  
Соленков В. В., 5, 6  
Сорокин В. Д., 6  
Сычевский В. А., 3

**Т**

Тарасова М. Н., 1

**Ф**

Фарзалиев Ю. З., 1  
Фархадзаде Э. М., 1  
Фираго Б. И., 6  
Фурсанов М. И., 3

**Х**

Хробостов А. Е., 6  
Хрусталев Б. М., 2

**Ч**

Чорный А. Д., 3

**Ш**

Шибeko А. С., 1  
Широглазова Н. В., 3, 4  
Широков Г. О., 4  
Широков О. Г., 4  
Штепа В. Н., 5

**Щ**

Щербак Я. В., 5

**Я**

Ярмольчик Ю. П., 3