

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

| | |
|---------------------------------------|-------------------|
| Главный редактор | АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю. |
| Второй главный редактор | PIETRO ZUNINO |
| Заместитель главного редактора | АХМЕТОВА И.Г. |
| Научный редактор | КАЛИНИНА М.В. |
| Редактор | ВАЛЕЕВА С.Н. |

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

| | |
|---|--|
| Свидетельство о регистрации СМИ: | Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г. |
| Подписка: | Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740 |
| Сайт: | https://www.energyret.ru/ |
| Издатель: | Казанский государственный энергетический университет |
| Адрес издателя: | 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
| Адрес редакции: | 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
| Тел./факс: | +7 (843) 527-92-76 |
| Email: | problems_ener@mail.ru |
| Типография: | ООО «45», г. Казань, |
| Адрес типографии: | 420015, г. Казань, ул. Жуковского, 28а, помещ.1 |

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2020
Т.22, № 2
Март-Апрель

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Министерство образования и науки РФ
Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В журнале публикуются работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

| | | |
|------------------------|-----------------|----------------------|
| АРАКЕЛЯН Э.К. | МИНУЛЛИН Р.Г. | KURTH STEFFEN |
| БАРТОЛОМЕЙ П.И. | ОЛЬХОВСКИЙ Г.Г. | KOLCUN MICHAEL |
| БРОДОВ Ю.М. | ПОПОВ И.А. | BIANCHINI ALESSANDRO |
| БУХМИРОВ В.В. | СЕРГЕЕВ В.В. | FERRARA GIOVANNI |
| ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В. | ТЮТИКОВ В.В. | SIMONI DANIELE |
| ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А. | ФЕДОТОВ А.И. | SKODA RADEK |
| ГУМЕРОВ Ф.Х. | ФРОЛОВ В.Я. | TOMAN PETR |
| ВАНЬКОВ Ю.В. | ЧИЧИРОВА Н.Д. | DESHPANDE PRAVIN |
| ИВШИН И.В. | КОРОВКИН Н.В. | VAKKILAINEN ESA |
| КОЗЛОВ В.К. | ЩИННИКОВ П.А. | RASSÖLKIN ANTON |
| ЛАПТЕВ А.Г. | ЩУКИН А.В. | BOYADJIEV CHRISTO |
| ЛЕУХИН А.Н. | ЯКИМОВ Н.Д. | BURGANOV BULAT |

Свидетельство о регистрации СМИ:

журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2020
Vol. 22, № 2
March-April
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials. Language of publications: Russian, English.

Sections:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Editorial board:

RASHID Z. AMINOV
EDIK K. ARAKELYAN
PETR I. BAROLOMEI
YURY M. BRODOV
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
ALEXANDER V. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
VADIM A. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
FARID M. GUMEROV
LEUKHIN A.N.
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
VLADIMIR K. KOZLOV

VITALIY V. SERGEEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
ALEXANDER I. FEDOTOV
NATALIA D. CHICHIROVA
ANATOLY G. LAPTEV
GUZEL R. MINGALEEVA
RENAT G. MINULLIN
GURGEN G. OLKHOVSKY
IGOR AI. POPOV
PAVEL A. SHCHINNIKOV
ANDREY V. SHCHUKIN
EMIL V. SHAMSUTDINOV
NIKOLAI D. YAKIMOV

BIANCHINI ALESSANDRO
FERRARA GIOVANNI
SIMONI DANIELE
SKODA RADEK
TOMAN PETR
DESHPANDE PRAVIN
VAKKILAINEN ESA
RASSÖLKIN ANTON
BOYADJIEV CHRISTO
BULAT BURGANOVA
NIKOLAI V. KOROVKIN
CHRISTO B. BOYADJIEV
STEFFEN KURTH
MICHAIL KOLCUN

Address

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

Tel./fax:

+7 (843) 527-92-76

Email:

problems_ener@mail.ru

Site:

<https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

| | |
|---|----|
| ЛУКАНИН П.В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий | 3 |
| ФАРАХОВ Т.М., ЛАПТЕВ А.Г. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами | 12 |
| ВУ НГОК ЗАН., Новиков В.Ф. Изучение сорбционных свойств органических растворителей в условиях тонкослойной и колоночной хроматографии | 19 |
| КОСТИНСКИЙ С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения. | 27 |
| СЕКРЕТАРЕВ Ю.А., МЕНЯЙКИН Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии. . | 43 |
| ФИШОВ А.Г., МУРАШКИНА И.С., МАРЧЕНКО А.И., ЭНХСАЙХАН Э., ИВКИН Е.С. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы | 51 |
| ГРАЧЕВА Е.И., ГОРЛОВ А.Н., ШАКУРОВА З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривзаводского электроснабжения. | 65 |

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

| | |
|--|----|
| ИВАНОВА В.Р., НОВОКРЕЩЕНОВ В.В., РОЖЕНЦОВА Н.В. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S SCHNEIDER ELECTRIC. | 75 |
| МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., МАЛАЦИОН А.С. Метод формирования Q-таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. | 86 |
| АХМЕД ЗАБАСС., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А., БАЛАБАНОВ А.М., ЛЕСС В.М. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций Ирака солнечной энергии, как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны. | 98 |

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО_ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

| | |
|---|-----|
| НГУЕН ТЪИ КИЕН., КАШАЕВ Р.С. Стенд ПМР-анализатора для измерения вязкости и состава многокомпонентных жидкостей методом ПМР-релаксометрии. | 108 |
| ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., АХМЕТВАЛЕЕВА Л.В., ЕНИКЕЕВА Г.Р., ИВАНОВ Д.А., МАРДАНОВ Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах. | 117 |

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

| | |
|--|----|
| LUKANIN PV. Estimation of energy efficiency of kraft pulp production with the exergy increment method. | 3 |
| FARAKHOV TM, LAPTEV AG. Modeling of temperature profiles and efficiency of heat transfer equipment with intensifiers. | 12 |
| VU NGOC DAN, NOVIKOV BF. Study of the sorption properties of solvents in thin-layer and column chromatography. | 19 |
| KOSTINSKIY SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems. | 27 |
| SEKRETAREV YA, MENYAIKIN DA. Features of calculations of consequences of failures of power supply in distribution networks with the monoconsumer of electric energy. . . | 43 |
| FISHOV AG, MURASHKINA IS, MARCHENKO AI, ERDENEBAT E, IVKIN YS. The study of electronic generation effect on statical aperiodic stability of electrical power system. . . . | 51 |
| GRACHEVA EL, GORLOV AN., SHAKUROVA ZM. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems. | 65 |

ELECTRICAL ENGINEERING

| | |
|---|----|
| IVANOVA VR, NOVOKRESHENOV VV, ROZHENCOVA NV. Development of an algorithm for effective management of the technological process of the industrial enterprise based on the programmable logic controller TM171PDM27S SCHNEIDER ELECTRIC. | 75 |
| MALEV NA, POGODITSKY OV, MALACION AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. | 86 |
| AHMED Z. ABASS, PAVLYUCHENKO DA, BALABANOV AM, LESS VM. Inclusion of solar energy in Iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage. | 98 |

INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING
DEVICES AND SYSTEMS

| | |
|--|-----|
| NGUYEN CHI KIEN, KASHAEV RS. Testing stand of PMR analyzer for measuring viscosity and composition of multicomponent liquids by PMR relaxometry method. | 108 |
| GOLENISHCHEV-KUTUZOV AV, AKHMETVALEEVA LV, ENIKEEVA GR, IVANOV DA, MARDANOV GD. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. | 117 |



ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ МЕТОДОМ ПРИРАЩЕНИЯ ЭКСЕРГИЙ

П.В. Луканин

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия
lukanin@gturp.spb.ru

Резюме: В настоящей работе приводятся результаты эксергетического анализа технологической схемы производства сульфатной целлюлозы.

В работе подробно рассмотрены результаты эксергетических балансов основных процессов производства сульфатной целлюлозы – регенерация щелочей в СРК, процесса выпаривания черного щелока, варки технологической щепы, процесс декарбонизации известняка.

Выполненный анализ технологической схемы позволяет выявить наиболее «узкие» места в использовании тепловой энергии и обосновать основные направления повышения энергоэффективности рассмотренных процессов. Основная доля затраченной эксергии в существующем процессе производства целлюлозы связана с регенерацией щелочи в СРК и составляет 70 % от всей подведенной эксергии в схеме.

Рассмотрен способ гидротермального получения химикатов в процессе производства сульфатной целлюлозы.

В работе представлена принципиальная схема и анализ технологии теплоты производства сульфатной целлюлозы, суть которой заключается в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из известерегенерационной печи при температуре 80-90 °С. Вывод органики в этих условиях может достигать 70 %.

В рассмотренном варианте эксергетический КПД $\eta_e = 80\%$ значительно выше, чем КПД существующей схемы регенерации химикатов $\eta_e = 48\%$. Это свидетельствует о высокой энергетической эффективности предлагаемого способа.

Ключевые слова: эксергетический анализ, технология теплоты, производство сульфатной целлюлозы, выпаривание, черный щелок, эксергетический КПД, энергосбережение.

Для цитирования: П.В. Луканин. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11.

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF KRAFT PULP PRODUCTION WITH THE EXERGY INCREMENT METHOD

P.V. Lukanin

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint Petersburg, Russia
lukanin@gturp.spb.ru

Abstract: This article contains results of exergic analysis of kraft pulping flow chart.

The results of exergic balances of main kraft pulping processes such as alkali recovery at recovery boilers, black liquor evaporation, chips cooking, lime decarbonation are considered in details in the article.

The analysis of the process flow chart makes it possible to determine the bottlenecks in the use of heat energy and to substantiate principal lines for increasing energy efficiency of the processes under study. A main share of the exergy expended in the existing pulping process is due to alkali recovery in the recovery boiler and comprises 70% of the total exergy available in the system.

A procedure of hydrothermal production of chemicals in the process of kraft pulping is studied.

A schematic diagram and analysis of heat technique of the kraft pulping process which in fact consists of organic component removal from black liquor through its autoclave carbonation with flue gases releasing from lime kiln at the temperature 80-90 °C are given in the article. The removal of organic components under these conditions can reach 70 %.

In the studied version the exergic efficiency $\eta = 80 \%$ is considerably higher than that of the flow chart existing for chemicals recovery which is equal to $\eta = 48 \%$. This is the evidence of high energy efficiency of the method developed.

Key words: *exergic analysis, heat technique, kraft pulping process, evaporation, black liquor, energy efficiency, energy saving.*

For citation: Lukanin PV. Estimation of energy efficiency of kraft pulp production with the exergy increment method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(2):3-11. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-3-11.

Введение

Главными целями основных положений «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р, является определение путей и условий наиболее эффективного использования энергетических ресурсов, формирование роли энергии как основного фактора, определяющего повышение качества жизни населения.

Практическое достижение этой цели возможно при разработке научных основ энергосбережения, включая термодинамический анализ существующих или проектируемых систем, разработку тепловых схем на его основе, оптимизацию их параметров, интенсификацию процессов теплопередачи, разработку и освоение новых типов теплообменной аппаратуры. Для процессов химической технологии особенно важным является учет специфических особенностей технологического процесса.

Одним из основных направлений технического прогресса в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) как отрасли химической технологии является инновационный путь развития на основе разработки новых ресурсосберегающих экологически чистых технологий и оборудования для повышения качества имеющихся и новых видов продукции, снижение энергетических затрат в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства, что является актуальной задачей на современном этапе.

Эксергетический метод термодинамического анализа

Применяемый для определения термодинамической эффективности тепловых процессов метод тепловых балансов является отражением первого закона термодинамики и не учитывает качественную сторону теплоты.

Эксергетическим методом термодинамического анализа, учитывающим как первый, так и второй закон термодинамики удается устранить в значительной мере недостатки метода тепловых балансов. Несмотря на то, что эксергетический метод давно уже нашел признание для анализа термодинамических систем, он медленно внедряется в практику термодинамического анализа тепловых технологических схем. Это объясняется тем, что при применении классического метода эксергетического анализа не удается установить связь эксергетического КПД элемента с общим эксергетическим КПД сложной термодинамической системы (тепловой схемы технологического процесса).

Модификация метода эксергетического анализа – энтропийный метод (метод вычитания эксергетических потерь). Но замена понятного и обоснованного с термодинамических позиций эксергетического КПД предложенными относительными коэффициентами эксергетических потерь также не устраняет полностью недостатки классического эксергетического метода термодинамического анализа.

Развитие теории эксергетического метода термодинамического анализа проведено путем введения понятия приращения эксергий, что устраняет недостатки присущие изложенным выше методам. При составлении эксергетических балансов предлагается пользоваться не значениями эксергии относительно окружающей среды, а их приращениями в процессе взаимодействия тепловых потоков. Такой подход позволил установить математическую связь между эксергетическим КПД элемента с эксергетическим КПД сложной тепловой схемы, куда входит этот элемент.

Материалы и методы

В настоящей работе приводятся результаты эксергетического анализа технологии производства сульфатной целлюлозы. На основе этого анализа делается попытка обосновать основные пути энергосбережения в этом процессе.

При производстве целлюлозы (рис.1) по сульфатному способу древесная щепа обрабатывается белым щелоком (растворами натриевых щелочей). В процессе варки органические соединения, основная часть которых представлена лигнином, переходит в раствор. Конечный продукт глубокой химической переработки древесины – целлюлоза, остается в твердой фазе. После выпаривания черного щелока крепкий раствор подают в содорегенерационный котел (СРК) на сжигание. В результате сжигания органической части черного щелока образуется плав минеральных солей. Полученный раствор каустицируют путем его обработки оксидом кальция, после чего карбонат кальция направляют на декарбонизацию в обжиговые печи.

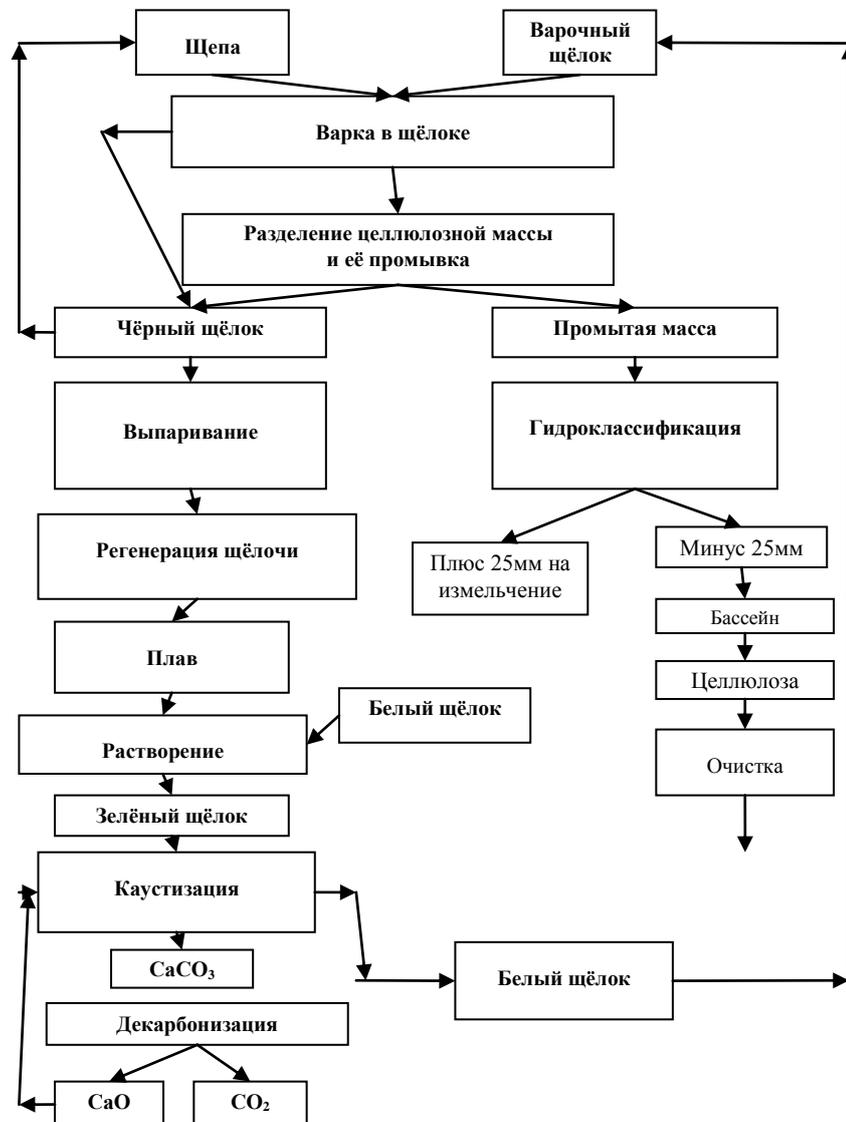


Рис.1. Принципиальная схема производства сульфатной целлюлозы

Практически вся подводимая энергия для непрерывного функционирования технологической схемы производства сульфатной целлюлозы обеспечивается лигнином

и другими углеводами, т.е. путем использования внутренних источников перерабатываемого сырья. Исключение составляет подвод высококачественного топлива на декарбонизацию известняка.

Обсуждение результатов

Результаты общего эксергетического баланса технологической схемы производства сульфатной целлюлозы приведены в табл.1.

Таблица 1

Эксергетические характеристики основных энергоиспользующих технологических процессов

| Процесс | № | Δe_{qzi} | $\Delta e_{qвоспр.i}$ | $\gamma_i, \%$ | $\delta_i, \%$ | $\eta_{ei}, \%$ | $\gamma_i \eta_{ei}$ |
|-------------------|----|------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------------|
| Выпарка | 1 | 840963 | 789298 | 2,81 | 2,64 | 93,85 | 2,64 |
| | 2 | 654487 | 588377 | 2,19 | 1,97 | 89,95 | 1,97 |
| | 3 | 574514 | 459284 | 1,92 | 1,54 | 80,06 | 1,54 |
| | 4 | 491560 | 410745 | 1,64 | 1,37 | 83,82 | 1,37 |
| | 5 | 297779 | 228170 | 1,00 | 0,76 | 76,00 | 0,76 |
| | 6 | 238389 | 207384 | 0,80 | 0,69 | 86,76 | 0,69 |
| | 7 | 59773 | 0 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 8 | 163019 | 0 | 0,54 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Регенерация в СРК | 9 | 3460000 | 883877 | 11,58 | 2,96 | 25,56 | 2,96 |
| | 10 | 12411246 | 5632976 | 41,54 | 18,85 | 45,38 | 18,85 |
| | 11 | 495000 | 303088 | 1,66 | 1,01 | 60,84 | 1,01 |
| | 12 | 452500 | 367626 | 1,51 | 1,23 | 81,48 | 1,23 |
| | 13 | 962364 | 729252 | 3,22 | 2,44 | 75,80 | 2,44 |
| | 14 | 1278750 | 800250 | 4,28 | 2,68 | 62,58 | 2,68 |
| | 15 | 580075 | 397204 | 1,94 | 1,33 | 68,52 | 1,33 |
| | 16 | 24276 | 0 | 0,08 | 0 | 0 | 0 |
| | 17 | 23363 | 0 | 0,08 | 0 | 0 | 0 |
| | 18 | 158600 | 0 | 0,53 | 0 | 0 | 0 |
| | 19 | 354000 | 0 | 1,18 | 0 | 0 | 0 |
| | 20 | 1064000 | 0 | 3,56 | 0 | 0 | 0 |
| Обжиг в печи | 21 | 736000 | 426725 | 2,46 | 1,43 | 58,05 | 1,43 |
| | 22 | 661900 | 421360 | 2,21 | 1,41 | 63,10 | 1,41 |
| | 23 | 1094680 | 421487 | 3,66 | 1,41 | 38,54 | 1,41 |
| | 24 | 1706 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 |
| | 25 | 578000 | 0 | 1,93 | 0 | 0 | 0 |
| | 26 | 300370 | 0 | 1,00 | 0 | 0 | 0 |
| | 27 | 55903 | 0 | 0,19 | 0 | 0 | 0 |
| Варка | 28 | 292935 | 261040 | 0,98 | 0,87 | 89,15 | 0,87 |
| | 29 | 259094 | 212305 | 0,87 | 0,71 | 81,67 | 0,71 |
| | 30 | 59963 | 28207 | 0,20 | 0,09 | 47,20 | 0,09 |
| | 31 | 830115 | 557984,15 | 2,78 | 1,87 | 67,17 | 1,87 |
| | 32 | 424247 | 239966 | 1,42 | 0,80 | 56,56 | 0,80 |
| итого | | 29879571 | 14366606 | | | | 0,48 |

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

Δe_{qzi} , $\Delta e_{qвоспр.i}$ – приращение затраченной и воспринятой эксергии в процессе термического взаимодействия в i – ом элементе, кДж/т целлюлозы; γ_i – доля затраченной эксергии в i – ом элементе к общей затраченной эксергии в системе, %; δ_i – доля воспринятой эксергии в i – ом элементе к общей затраченной эксергии в системе, %; η_{ei} – эксергетический КПД i – ого элемента, %; η_{ei} – доля КПД i – ого элемента в КПД общей тепловой схемы.

Цифры и числа во втором столбце таблицы соответствуют отдельным энерготехнологическим процессам в различных элементах при их реализации: 1-6 – процессы выпаривания по корпусам выпарных аппаратов; 7 – процесс потери эксергии с паром 6 – го корпуса в окружающую среду; 8 – процесс потери эксергии от дросселирования греющего пара на первый корпус выпарной батареи; 9 – процесс испарения воды в СРК; 10 – процесс парообразования; 11 – процесс теплоотдачи теплоты от плава к промывной воде; 12 – процесс в защитном пучке; 13 – процесс в пароперегревателе; 14 – процесс в котельном пучке; 15 – процесс в водяном экономайзере; 16 – процесс потери эксергии теплоотдачей в окружающую среду через изоляцию и неизолированные участки; 17 – процесс потери эксергии с дымовыми газами; 18 – процесс потери эксергии на плавление солей; 19 – процесс потери эксергии теплоты от неполноты сгорания; 20 – процесс потери эксергии на восстановление сульфатов; 21 – процесс испарения и перегрев водяных паров; 22 – процесс обжига извести; 23 – процесс подогрева воздуха известью в рекуператорах; 24 – процесс потери эксергии, уносимой с пылью извести; 25 – процесс потери эксергии теплоты при разложения карбоната; 26 – процесс потери эксергии теплоотдачей в окружающую среду; 27 – процесс потери эксергии с дымовыми газами, включая выделяющуюся углекислоту; 28 – процесс в расширителе первой ступени; 29 – процесс в расширителе второй ступени; 30 – процесс пропарки щепы; 31 – процесс в парожидкостном теплообменнике; 32 – процесс теплообмена между сваренной технологической щепой и промывной водой в варочном котле.

Общая затраченная эксергия – $E_{з,общ}$ для всех технологических процессов в системе составляет 29879571 Дж.

Определение эксергетических характеристик производилось методом приращений эксергии [1–3].

Анализ приведенных результатов позволяет установить, что основная доля затраченной эксергии в процессе производства целлюлозы связана с процессом регенерации щелочи в СРК. В процессе регенерации щелочи затрачивается 70% эксергии, подведенной в схеме. Из них 53 % затрачивается на процессы выпаривания воды из раствора и получения водяного пара в котле с соответствующими эксергетическими КПД – 25,56 % и 45,38 %, соответственно.

Влияние этих процессов на общий эксергетический КПД настолько велико, что они определяют величину эксергетического КПД схемы в целом, который составляет 48 %.

Вторым процессом по величине затраченной эксергии является процесс декарбонизации известняка. Здесь затрачивается 11,46 % от всей затраченной эксергии в схеме технологии производства. Этот процесс характеризуется низким (37 %) эксергетическим КПД.

Следующим процессом является выпарка черного щелока. Величина затраченной эксергии в процессе составляет 11,10 % при эксергетическом КПД этого процесса 81 %.

Последующим теплоиспользующим процессом по величине затраченной эксергии (6,25 %) является варка технологической щепы. Этот процесс характеризуется эксергетическим КПД 69,44 %, что не отвечает современным требованиям к эксергетическому КПД современных гидрохимических процессов.

Низкий эксергетический КПД процесса регенерации химикатов, который определяет и низкий эксергетический КПД производства сульфатной целлюлозы в целом, характерен для процесса в сордерегенерационном котле (СРК). КПД этого процесса определяется величиной 43 % при подводе 70 % эксергии от всей подведенной эксергии в технологический процесс. Поэтому усилия зарубежных и российских специалистов направлены на совершенствование процесса в СРК. Кардинальным решением этой проблемы является исключение из технологической цепи этого энергозатратного и экологически опасного процесса.

Отмечаются [4–7] следующие преимущества технологического процесса без СРК по сравнению с традиционным методом:

- более высокий эксергетический КПД энергетического котла по сравнению с СРК;
- получение экологически безопасного высококалорийного топлива;
- дешевизна способа, так как энергетический котел в 4 раза дешевле, чем СРК;
- более безопасная эксплуатация оборудования – не образуется расплавленных солей, которые создают опасность взрыва при контакте с водой.

В работе предлагается способ гидротермального получения химикатов в процессе производства сульфатной целлюлозы. На рис.2 представлена предлагаемая принципиальная схема. Суть этой технологии заключается в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из извести регенерационной печи (ИРП), в присутствии антрахинона при температуре 80-90 °С. По литературным данным выход органики в этих условиях может достигать 70 % [8,9].

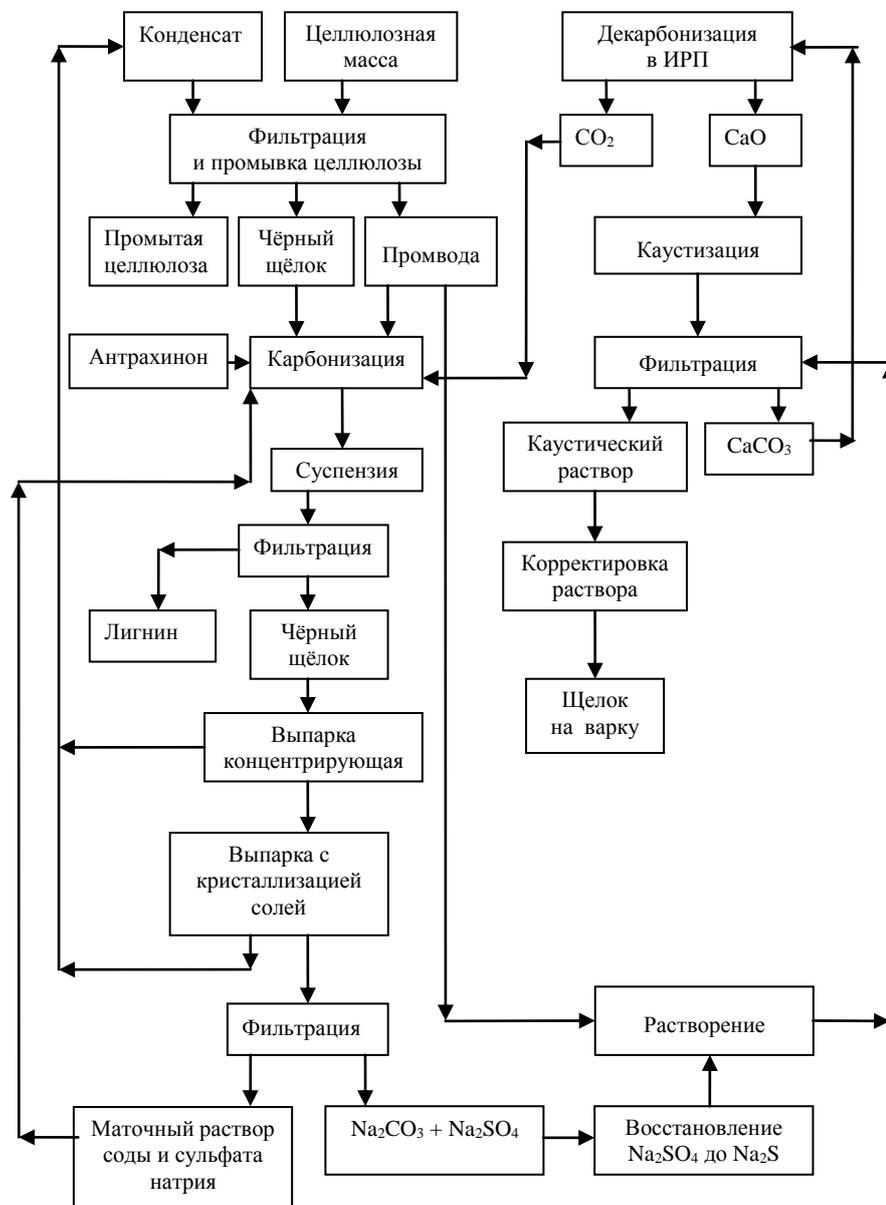


Рис.2. Принципиальная схема технологии теплоты в процессе регенерации химикатов

После фильтрации суспензии получают два продукта: органику, в основном в виде лигнина и лигнин содержащих соединений и карбонатный щелок. Лигнин после гранулирования используют как экологически чистое энергетическое топливо. Раствор органических соединений черного щелока выпаривают в выпарной установке до состояния близкого к насыщенному по содосульфатным солям. Далее черный щелок подвергают концентрированию с выделением содосульфатной смеси в небольшой ветви содовой выпарки. Есть все основания полагать, что вместе с содосульфатной смесью выделится до 60 % оставшейся в растворе органики, которая может быть использована в качестве топлива в восстановительной печи при восстановлении сульфата натрия в сульфид, а также в процессе регенерации извести. Раствор содосульфатной смеси направляют на карбонизацию.

Отличие предлагаемой схемы тепловой переработки черного щелока от существующей состоит в следующем:

– ввод новой технологической операции – автоклавная карбонизация черного щелока с целью вывода из процесса лигнина и других органических соединений и их гранулирования;

– увеличение числа ступеней выпаривания концентрирующей выпарки;

– восстановление сульфата натрия в сульфид натрия в восстановительной печи, где в качестве топлива может быть использован выделенный из раствора лигнин;

– замена суперконцентраторов перед СРК второй стадией выпаривания с выделением содосульфатной смеси в трех – четырех ступенчатых выпарных установках;

– вывод из технологического процесса СРК.

Из перечисленных технологических операций не трудно заключить, что новая технология теплоты производства сульфатной целлюлозы может быть освоена путем несложной реконструкции действующей технологической схемы.

Действительно, к принципиально новым технологическим операциям следует отнести автоклавный процесс с получением гранулированного продукта из органических соединений и восстановление сульфата натрия до сульфида натрия. Из общего баланса эксергий взаимодействующих потоков в технологии сульфатного производства установлено, что затраты эксергии в процессе восстановления сульфатов натрия до сульфидов составляет менее 4,0 %. Такой процесс может быть организован в небольшой восстановительной печи.

Остальные технологические операции, связанные с выпариванием раствора, могут быть реализованы на основе реконструкции действующих выпарных установок. Полученный гранулированный продукт из органических соединений может быть использован не только как высококалорийное экологически чистое топливо, но и как химическое сырье или в их комбинации. Окончательное решение может быть принято на основе изучения потребительской цены и спроса на этот продукт.

Так как в новом процессе регенерации химикатов процесс регенерации химикатов в СРК заменяется процессом выпаривания, рассмотрим эту технологическую систему как термодинамическую. Сопутствующие процессы восстановления сульфата натрия в сульфид натрия и регенерация извести являются вспомогательными операциями. Эти операции по затратам эксергии не определяют степень термодинамического совершенства системы регенерации химикатов в целом в виду их малости и поэтому в настоящей статье не рассматриваются.

Рассмотрим две стадии выпаривания черного щелока.

На первой стадии выпаривания производится концентрирование черного щелока до насыщения солей. Все процессы первой стадии выпаривания характеризуются очень высоким $\eta_e = 90 - 97 \%$. Эксергетический КПД процесса выпаривания первой стадии определяется величиной 80 %, что существенно ниже составляющих ее элементов. Это связано с отводом 7 % эксергии теплового потока пара десятого корпуса в окружающую среду. Использование теплоты пара 10 корпуса для нагрева технологических растворов позволит существенно повысить эксергетический КПД процесса выпаривания первой стадии.

Из материального баланса следует, что на второй стадии выпаривания выделяется 15 % от общей выпаренной воды.

Заключение

Представлена принципиальная схема и анализ технологии теплоты производства сульфатной целлюлозы, заключающаяся в выводе органической составляющей из черного щелока путем его автоклавной карбонизации дымовыми газами, отходящими из известерегенерационной печи при температуре 80-90 °С. Вывод органики в этих условиях может достигать 70 %.

В рассмотренном варианте эксергетический КПД $\eta_e = 80 \%$ значительно выше, чем КПД существующей схемы регенерации химикатов $\eta_e = 48 \%$. Из этого следует, что часть получаемого топлива на основе лигнина может быть использована на собственные нужды, а другая половина реализована в качестве экологически безопасного высококалорийного возобновляемого топлива.

Дальнейшее совершенствование технологии теплоты в процессе регенерации химикатов может идти в следующих направлениях:

– использование теплоты паросодержащих дымовых газов корьевых котлов для выпаривания слабого черного щелока. Расчеты показали, что расход греющего пара на выпаривание, а следовательно, и расход органического топлива на собственные нужды может быть сокращен дополнительно на 30 – 50 %;

– повышение эксергетического КПД первой и второй стадии выпаривания путем оптимизации их параметров: числа ступеней выпаривания, концентрации а.с.в. на первой и второй стадии выпаривания, использования теплоты пара вакуумных корпусов и др [10–12].

Можно прогнозировать, что путем рационального потребления лигнинсодержащего топлива по гидротермальному способу регенерации химикатов затраты на собственные технологические нужды производства сульфатной целлюлозы могут быть сокращены до 20-30 % [13–16].

Литература

1. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса // Промышленная энергетика. 2010. №1. С. 38-41.
2. Калинин Н.В., Мартынов А.В., Калинина Е.И. Об эксергии и КПД (К юбилею учителя) // Холодильная техника. 2019. №10. С. 42-45.
3. Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Определение эксергии в теплотехнических системах // Материалы Международной научной конференции «Наука. Исследования. Практика»; 24 февраля 2020 г., Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. С 184-186.
4. Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В. Энергоэкологические аспекты в процессе переработки черного щелока сульфатной целлюлозы // Труды 20 Менделеевского съезда по общей и прикладной химии; 26-30 сентября 2016 г., Екатеринбург: Уральское отделение Российской Академии Наук, 2016. С. 512.
5. Timpe W., Evers W. A new process for the recovery of heat and chemicals from black liquor from cellulose sulfate production using hydrolysis // Pulp and Paper. 1972. N11. pp. 56-57.
6. Ma Keo P. Rapid pyrolysis of black sulfate liquor // Paperu I Puu. 1995. N1-2. pp. 39-44.
7. Вагин Г.Я. К вопросу о повышении энергетической эффективности промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 2-6.
8. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Гидрохимический способ регенерации натриевых щелочей. Патент РФ на изобретение № 2415984. 10.04.2011. Бюл. №10.
9. Alén R., Sjöström E., Vaskirari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors // Cellulose Chemistry and Technology. 1985. Vol. 19, N5. pp. 537-541.
10. Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., и др. Модернизация технологического процесса переработки черных щелоков сульфатной целлюлозы // Прикладная химия. 2016. №5(89). С. 654-659.
11. Луканин П.В., Казаков В.Г., Смирнова О.С. Технология теплоты в гидрохимическом способе регенерации химикатов производства сульфатной целлюлозы // Промышленная энергетика. 2012. №11. С.44-48.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove // International Journal of Science and Research. 2017. Vol.6, N6. pp. 2200-2207.
13. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects // Taylor & Francis Group (NY); 2017.
14. Sivashanmugam P., Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts // Chemical Engineering and Processing. 2007. N46. pp.1292-1298.
15. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. N74. pp. 220-234.
16. Zhang Z., Way J.D., Wolden C.A., et al. Barium-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonia synthesis // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2019. Vol. 7. N21. pp.18038-18047.

Автор публикации

Луканин Павел Владимирович – канд. техн. наук, профессор, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

References

1. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Uproshchennyi metod opredeleniya eksergeticheskogo KPD slozhnoi teplovoi skhemy tekhnologicheskogo protsesssa. *Promyshlennaya energetika*. 2010;1:38-41.

2. Kalinin N.V., Martynov A.V., Kalinina E.I. Ob eksergii i KPD (K Jubeleju uchitelja) *Holodil'naja tekhnika*. 2019;10:42-45.
3. Yushkova EA, Lebedev VA. Opredelenie eksergii v teplotekhnicheskikh sistemakh. Nauchnaya konferentsiya «Nauka. Issledovaniya.Praktika», 24 Feb 2020; Saint-Peterburg, Russia. Saint-Peterburg: GNI «Natsrazvitie», 2020. pp. 184-186.
4. Lukanin PV, Kazakov VG, Fyedorova OV. Energoekologicheskie aspekty v protsesse pererabotki chyernogo shcheloka sul'fatnoi tsellyulozy. *XX Mendeleevskiy s'ezd po obshchei i prikladnoi khimii; 26-30 Sen 2016; Ekaterinburg, Russia*. Ekaterinburg: Uralskoye otdelenie Rossiiskoi Akademii Nauk, 2016. P. 512.
5. Timpe W., Evers W. A new process for the recovery of heat and chemicals from black liquor from cellulose sulfate production using hydrolysis. *Pulp and Paper*. 1972;11: 56-7.
6. Ma Keo P. Rapid pyrolysis of black sulfate liquor. *Papery I Puu*. 1995;1-2: 39-44.
7. Vagin GYa. K voprosu o povyshenii energeticheskoi effektivnosti promyshlennykh predpriyatii // *Promyshlennaya energetika*. 2013;5: 2-6.
8. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. *Gidrokhimicheskii sposob regeneratsii natrievykh shchelochei*. Patent RUS № 2415984. 10.04.2011. Byul. №10.
9. Alén R, Sjöström E, Vaskirari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors. *Cellulose Chemistry and Technology*. 1985;19 (5): 537-541.
10. Lukanin PV, Kazakov VG, Fyedorova OV, et al. Modernizatsiya tekhnologicheskogo processa pererabotki chyernykh shchelokov sul'fatnoi tsellyulozy. *Prikladnaya khimiya*. 2016; 89(5):654-659.
11. Lukanin PV, Kazakov VG, Smirnova OS. Tekhnologiya teploty v gidrokhimicheskom sposobe regeneratsii khimikatov proizvodstva sul'fatnoi tsellyulozy. *Promyshlennaya energetika*. 2012; 11: 44-8.
12. Nimish Dubey, Morrish Kumar. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove. *International Journal of Science and Research*. 2017;6 (6):2200-7.
13. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. *The Global Forest Sector: Changes. Practices and Prospects*. Taylor & Francis Group (NY);2017.
14. Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts. *Chemical Engineering and Processing*. 2007;46:1292-8.
15. Shyy Woei Chang, Wei Ling Cai, Ruo Sin Syu. Heat transfer and pressure drop measurements for tubes fitted with twin and four twisted fins on rod. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 74: 220-234.
16. Zhang Z, Way JD, Wolden CA, et al. Barium-promoted ruthenium catalysts on yttria-stabilized zirconia supports for ammonia synthesis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019; 7(21):18038-18047.

Author of the publication

Pavel V. Lukanin – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia. Email: lukanin@gturp.spb.ru.

Поступила в редакцию

23.03.2020 г.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ

Т.М. Фарахов, А.Г. Лаптев

Казанский государственный энергетический университет г. Казань, Россия

tvt_kgeu@mail.ru

Резюме: Рассмотрена задача определения полей температур в потоках и эффективности теплообменников с интенсификацией металлическими хаотичными насадочными упаковками. Представлены результаты экспериментальных исследований нагрева индустриального масла горячей водой в теплообменнике типа – "труба в трубе", где во внутренней трубе размещена хаотичная насадка с номинальным размером 6 мм.

Насадка за счет турбулизации потока масла обеспечивает переход от ламинарного режима к турбулентному и значительное повышение коэффициента теплоотдачи (в 15-20 раз).

Для расчета температурных профилей в каналах записана ячеечная модель структуры потоков, где основными параметрами являются тепловое число единиц переноса и число ячеек полного перемешивания. Даны выражения для расчета этих параметров в трубах с хаотичными насадками. Приведены результаты расчетов профилей температур при различных расходах нагреваемого масла и показано удовлетворительное согласование с опытными данными. Расчет температурных полей позволяет учесть изменение теплофизических свойств потоков по длине каналов, что особенно важно для углеводородных смесей с повышенной вязкостью и большими числами Прандтля.

Представленная математическая модель позволяет учесть структуру потоков теплоносителей в аппаратах с интенсификаторами и вычислить тепловую эффективность процессов нагрева и охлаждения сред.

Ключевые слова: теплообмен, структура потока, хаотичные насадки, ячеечная модель, интенсификация.

Для цитирования: Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-12-18.

MODELING OF TEMPERATURE PROFILES AND EFFICIENCY OF HEAT TRANSFER EQUIPMENT WITH INTENSIFIERS

TM. Farakhov, AG. Laptev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The problem of determination of temperature fields in the flow and efficiency of heat exchangers with intensification by metal chaotic packings is considered. Results of experimental studies of the heating of industrial oil with hot water in a "pipe-in-pipe" heat exchanger, where a chaotic packing of nominal size 6 mm is placed in the internal pipe, are presented.

The packing, due to turbulence in the flow of oil, provides transition from the laminar to the turbulent regime and a significant increase in heat transfer coefficient (by 15-20 times).

For calculating temperature profiles in channels, a cell model of the flow structure is written, where the main parameters are thermal number of transfer units and number of complete mixing cells. Expressions are given for calculating these parameters in pipes with chaotic packings. Results of calculating temperature profiles for various flowrates of the heated oil are presented and satisfactory agreement with experimental data is shown. The calculation of temperature fields makes it possible to take into account a change in thermophysical properties of flows along the length of the channels, which is especially important for hydrocarbon mixtures with high viscosity and large Prandtl numbers.

The presented mathematical model allows to take into account the structure of heat carrier flows in apparatus with intensifiers and to calculate thermal efficiency of the processes of heating and cooling the media.

Keywords: heat transfer; flow structure; chaotic packings; cell model; intensification.

For citation: Farakhov TM, Laptev AG. Modeling of temperature profiles and efficiency of heat transfer equipment with intensifiers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-12-18.

Введение

Традиционные методы расчетов теплообменных аппаратов, построенные с применением уравнений теплового баланса и теплопередачи, не учитывают обратное перемешивание теплоносителей, т.е. справедливы при идеальном вытеснении потоков [1-3]. Такой подход допустим в расчетах теплообменников с гладкими поверхностями, без дополнительных устройств (перегородок, интенсификаторов и т.д.), вызывающих интенсивную турбулентность и значительное обратное перемешивание потоков. Известно, что обратное перемешивание снижает движущую силу процессов переноса (в данном случае температурный напор), и для достижения заданных показателей теплообменника требуется увеличение площади поверхности теплопередачи. Для учета обратного перемешивания применяются диффузионная или ячеечная модели структуры потоков, где основным параметром является коэффициент обратного перемешивания (в безразмерном виде модифицированное число Пекле). Если число $Pe < 20$, то перемешивание необходимо учитывать, где $Pe = u_{cp} l / D_{п}$; u_{cp} – средняя скорость потока, м/с; l – характерный размер, м; $D_{п}$ – коэффициент обратного перемешивания, м²/с [4-6].

В работах И.А. Гильденבלата и В.Н. Бобылева и др. показаны возможности в описании температурных профилей при помощи диффузионной модели структуры потоков [7-9].

Дальнейшие исследования влияния обратного (продольного) перемешивания потоков и интенсификаторов на эффективность теплообменников выполнены А.И. Леонтьевым, Голованчиковым А.Б. и др. [10-12].

Целью данной работы является разработка математической модели теплопереноса на основе применения ячеечной модели структуры потоков для теплообменников с объемным интенсификатором – хаотичной насадкой.

Материалы и методы. Ячеечная модель

Однопараметрическая ячеечная модель является простейшей математической моделью и основана на допущении полного перемешивания потока в пределах одной ячейки. В аппарате или канале находится n ячеек, между которыми перемешивание отсутствует. Число ячеек находится экспериментально на основе функции реального времени пребывания потока в аппарате и связано числом Пекле структуры потока. Известно, что при $n = 1$ в аппарате полное перемешивание и минимальная эффективность процесса из-за низкого значения движущей силы. При $n \rightarrow \infty$ – максимальная возможная эффективность при заданных условиях проведения процесса.

Для моделирования температурных профилей теплоносителей в теплообменнике типа «труба в трубе», где во внутренней трубе размещается объемный интенсификатор в виде мелкой хаотичной насадки, примем ячеечную модель с условным делением потоков в каналах теплообменного аппарата на ряд последовательных ячеек полного перемешивания (рис. 1).

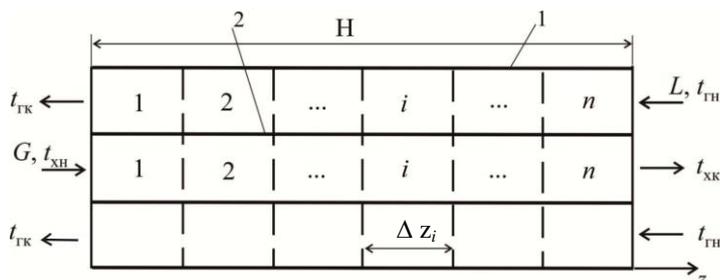


Рис. 1 Условное деление теплообменника «труба в трубе» на ячейки полного перемешивания:
1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба с насадкой.

Рассматривается задача моделирования нагрева холодного теплоносителя с начальной температурой на входе (при $i = 1$), с помощью горячего теплоносителя в противотоке с начальной температурой $t_{гн}$ (при $i = n$), где t – температура теплоносителя, °С; n, k – начальные и конечные значения; $г, х$ – горячий и холодный теплоносители.

Из решения находятся температуры теплоносителей в ячейках и температуры на выходах каналов ($t_{хк}, t_{гк}$).

Конечно, число ячеек в канале без насадки (во внешней трубе) и трубе с насадкой не совпадает. В трубе с насадкой за счет более интенсивного перемешивания число ячеек будет меньше, чем во внешней трубе. Во внешней трубе без интенсификаторов практически идеальное вытеснение потока. Однако в рассматриваемой задаче нагрева индустриального масла горячей водой (аналогично греющим паром), основное сопротивление теплопередачи сосредоточено во внутренней трубе с маслом, где расположена насадка (как показывают эксперимент и расчеты). Кроме этого, температура горячей воды изменяется по длине канала незначительно, по сравнению с температурным профилем масла, поэтому допущение о одинаковом числе ячеек во внутренней и внешней трубе практически не скажется на результатах расчетов.

Известна эквивалентная связь между числом ячеек и числом Пекле. При $Re > 3$; $Pe = 2(n-1)$, где n – число ячеек; где число Пекле хаотичной для насадки вычисляется по формуле [13].

$$Pe = 0,52H(\xi / Re_3)^{0,25} d_3^{-1}, \quad (1)$$

где $Re_3 = u_{cp} d_3 / \nu_{ж}$ – число Рейнольдса; u_{cp} – средняя скорость среды в насадке, м/с; d – эквивалентный диаметр насадки, м; $\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости м²/с; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления насадки; H – длина слоя насадки, м.

Для учета изменения теплофизических свойств потока по ячейкам в зависимости от получаемого температурного профиля, можно использовать следующие выражения, например, для процесса нагрева масла в трубе с насадкой. Поток тепла Q_i в ячейке

$$Q_i = Gc_{pxi}(t_{xi} - t_{xi-1}) = K_i F_i (t_{gi} - t_{xi}), \quad (2)$$

Температуру второго теплоносителя в ячейке можно определить из уравнения теплового баланса

$$Q_i = Gc_{pxi}(t_{xi} - t_{xi-1}) = Lc_{pги}(t_{gi} - t_{gi-1}), \quad (3)$$

где G, L – массовые расходы холодной (нагреваемой) среды и горячей, кг/с; $c_{pxi}, c_{pги}$ – удельные теплоемкости холодной и горячей среды, Дж/кг К; K_i – коэффициент теплопередачи, Вт/м²К; F_i – площадь и поверхности теплопередачи в i -ой ячейке, м²;

$F_i = \pi d \Delta z_i$; $\Delta z_i = H / n$; n – число ячеек полного перемешивания; $i = 1, 2, \dots, n$.

Из соотношений (2) и (3) получим температуры холодного и горячего теплоносителей в ячейках

$$t_{xi} = \frac{t_{xi-1} + N_{oxi}}{1 + N_{oxi}}, \quad (4)$$

$$t_{gi} = t_{gi-1} + \frac{Gc_{pxi}}{Lc_{pги}}(t_{xi} - t_{xi-1}), i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где $N_{oxi} = K_i F_i / Gc_{px}$ – тепловое число единиц переноса для i -ой ячейки.

Для трубы с насадкой число Нуссельта $Nu_{3i} = \alpha_{3i} d_3 / \lambda_{жi}$ для ячейки ($Re_3 > 40$) [13]

$$Nu_{3i} = 0,175 Re_{3i}^{0,75} Pr_i^{0,33} \left(\xi_i / 2 \right)^{0,25} \left(\mu_{ж} / \mu_{ст} \right)_i^{0,14}. \quad (6)$$

где Pr – число Прантля; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; значение ξ_i – вычисляется по известному выражению по числу Рейнольдса для данной насадки.

Для трубы без насадки ($Re_d > 10^4$) по выражению Михеева

$$Nu_i = 0,022 Re_{di}^{0,8} Pr_i^{0,43}. \quad (7)$$

где $Re_d = u_{cp} d / \nu_{ж}$ – число Рейнольдса для канала без насадки.

Из выражений (6), (7) находятся коэффициенты холодного и горячего теплоносителей и далее по уравнению аддитивности термических сопротивлений коэффициент теплопередачи K_i для вычисления теплового числа единицы переноса N_{oxi} .

Выражения (4) и (5) решаются в итерационном цикле при: $i=1, t_x = t_{xH}$, (вход холодной среды); при $i=n, t_r = t_{rH}$ (выход нагреваемой среды в вход греющего теплоносителя). В первом приближении задаются температурные профили и затем уточняются в итерационном цикле до сходимости решений с учетом изменения теплофизических свойств среды.

Результаты расчетов

Выполнено решение приведенной системы уравнений (4), (5) для заданных условий проведения экспериментальных исследований нагрева индустриального масла горячей водой в теплообменниках типа «труба в трубе», где во внутренней трубе – мелкая хаотичная насадка с удельной поверхностью $560 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [14]. Результаты расчетов даны на рис. 2. Из расчетов следует удовлетворительное согласование ($\pm 1-2\%$) рассчитанных конечных температур масла (при $i=n$) с экспериментальными данными (точки) [14].

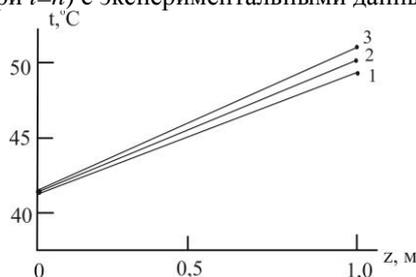


Рис. 2 Профили температуры масла по длине трубы с насадкой. Число Рейнольдса масла: 1 – $Re_m = 268,8$; 2 – $222,2$; 3 – $172,9$; число Рейнольдса греющей воды: 1 – $Re_b = 10108$; 2 – 10240 ; 3 – 10240 . Начальная температура масла: 1 – $t_m = 40,81^\circ\text{C}$; 2 – $40,78^\circ\text{C}$; 3 – $40,64^\circ\text{C}$. Начальная температура воды: 1 – $t_b=55,75^\circ\text{C}$; 2 – $55,73^\circ\text{C}$; 3 – $55,76^\circ\text{C}$ (см. табл. 1). Линии – расчет из решения уравнений (4), (5); точки – эксперимент.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные данные нагрева индустриального масла в трубе с насадкой

| Экспериментальные данные | | | |
|--|--------|--------|--------|
| Параметры и номер опыта | 1 | 2 | 3 |
| Расход горячей воды L , кг/с | 0,228 | 0,231 | 0,231 |
| Температура воды на входе, t_{rH} °C | 55,75 | 55,73 | 55,76 |
| Температура воды на выходе, t_{rB} °C | 55,05 | 55,1 | 55,23 |
| Расход масла G , кг/с | 0,0383 | 0,0312 | 0,0242 |
| Температура масла на входе, t_{xH} °C | 40,81 | 40,78 | 40,64 |
| Температура масла в выходе, t_{xB} °C | 49,34 | 50,39 | 51,02 |
| Расчетные данные эксперимента | | | |
| Поток тепла Q , Вт | 643,2 | 590,9 | 495,3 |
| Коэффициент теплопередачи K , Вт/м ² К | 911,5 | 878,6 | 785,3 |
| Тепловое число единиц переноса N_{ox} | 0,870 | 1,029 | 1,185 |
| Тепловая эффективность нагрева масла, η_x (эксперимент) | 0,571 | 0,643 | 0,686 |
| Тепловая эффективность, η_x (расчет) | 0,579 | 0,64 | 0,691 |

Таким образом, полученная система уравнений (4), (5) позволяет учесть теплофизические свойства при нагреве углеводородного или иного теплоносителя по длине канала и определить температуру на выходе при различных режимах и длине канала.

В рамках принятой модели профиль температуры в ячейках по длине канала также можно определить, используя тепловую эффективность ячейки при нагреве среды

$$\eta_{xi} = \frac{t_{xi} - t_{xi-1}}{t_{ri} - t_{xi-1}}; \tag{8}$$

и при охлаждении потока

$$\eta_{ri} = \frac{t_{ri} - t_{ri-1}}{t_{ri} - t_{xi}}, i = 1, 2, \dots, n. \tag{9}$$

Известно, что при $n = 1$ эффективность при полном перемешивании в ячейке

$$\eta_{ix} = \frac{N_{oxi}}{1 + N_{oxi}}, \eta_{ri} = \frac{N_{ori}}{1 + N_{ori}}, \tag{10}$$

где N_{oxi} , N_{ori} – тепловые числа единиц переноса для ячеек [15]; где $N_{ori} = K_i F_i / Lc_{p\Gamma i}$.

Из выражений (8) и (10) профиль температуры в ячейках при нагреве среды

$$t_{xi} = t_{xi-1} + (t_{\Gamma i} - t_{xi-1}) \frac{N_{oxi}}{1 + N_{oxi}}. \quad (11)$$

Из уравнения баланса тепла (3)

$$t_{\Gamma i} = t_{\Gamma i-1} - \frac{Gc_{pxi}}{Lc_{p\Gamma i}} (t_{xi} - t_{xi-1}). \quad (12)$$

При охлаждении горячего потока из (9) и (10) имеем

$$t_{\Gamma i} = t_{\Gamma i-1} - (t_{\Gamma i-1} - t_{xi}) \frac{N_{ori}}{1 + N_{ori}}, \quad (13)$$

$i = 1, 2, \dots, n$.

Из уравнения теплового баланса температура холодного теплоносителя.

$$t_{xi} = t_{xi-1} - \frac{Lc_{p\Gamma i}}{Gc_{pxi}} (t_{xi} - t_{xi-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Полученные системы уравнений (11), (12) и (13), (14) решаются итерационным методом, где тепловые числа единиц переноса N_{ori} и N_{oxi} вычисляются для каждой ячейки с коэффициентами теплопередачи для ячейки с учетом изменения теплофизических свойств среды по длине каналов.

Следует отметить, что системы уравнений (4), (5) и (11), (12), построенные с применением ячеечной модели, идентичные и дают практически одинаковые результаты.

При $n \rightarrow 1$ – практически полное перемешивание теплоносителя и минимальное значение тепловой эффективности, а при $n \rightarrow \infty$ идеальное вытеснение потока и максимальная эффективность при заданных условиях проведения процесса. В результате расчетов нагрева индустриального масла установлено, что при переходе от модели идеального вытеснения к идеальному смешению теплоносителя в канале с насадкой тепловая эффективность снижается на 25-30%.

Далее рассмотрен нагрев среды в канале с насадкой водяным паром через разделяющую стенку

Уравнение для потока тепла в ячейке

$$Q_i = Gc_{px} (t_{xi} - t_{xi-1}) = K_i F_i (t_{\text{пар}} - t_{xi}), \quad (15)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $t_{\text{пар}}$ – температура греющего пара, °С.

Или выражение (15) запишем в виде

$$t_{xi} - t_{xi-1} = N_{xi} (t_{\text{пар}} - t_{xi}). \quad (16)$$

Отсюда температура нагреваемой среды в ячейке

$$t_{xi} = \frac{t_{i-1} + N_{xi} t_{\text{пар}}}{1 + N_{xi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Выполнен расчет нагрева турбинного масла Т-22 (турбинное Л) при $G=0,77$ кг/с; $t_{\text{хн}}=30^\circ\text{C}$; $t_{\text{хк}}=80^\circ\text{C}$; $t_{\text{пар}}=150^\circ\text{C}$. Диаметр трубы 100 мм. Эквивалентный диаметр хаотичной насадки $d_3=0,036$ м.

На рис. 3 дан профиль температуры нагреваемого масла, а на рис. 4 зависимость числа Нуссельта от длины зоны нагрева.

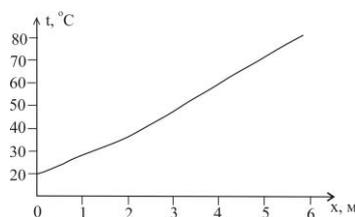


Рис. 3 Профиль температуры нагреваемого масла по длине канала. $L=19,3$ кг/с. $t_{\text{пар}}=150^\circ\text{C}$

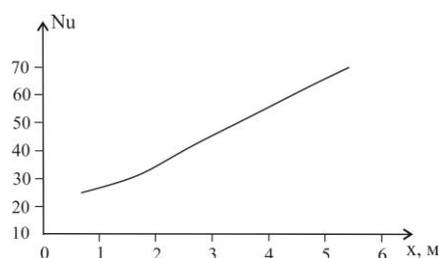


Рис. 4 Зависимость числа Нуссельта (β) от длины зоны нагрева за счет изменения теплофизических свойств масла. $L=19,3$ кг/с. $t_n=30^\circ\text{C}$; $t_k=80^\circ\text{C}$; $t_{\text{пар}}=150^\circ\text{C}$

Выводы

В статье рассмотрена и решена актуальная задача расчета температурных профилей потоков в теплообменниках с интенсификаторами, а так же даны результаты определения тепловой эффективности аппаратов с учетом структуры потоков нагреваемых или охлаждаемых сред. Представленные экспериментальные данные по нагреву индустриального масла водой в теплообменнике с насадкой. Показано согласование расчетной температуры масла на выходе теплообменника с опытными значениями. Сделан анализ влияния структуры потоков теплоносителей на тепловую эффективность.

Разработанная математическая модель позволяет учесть влияние изменения теплофизических свойств среды по длине каналов в теплообменниках с интенсификаторами на число Нуссельта и тепловую эффективность процесса.

Работа выполнена в рамках научного проекта РНФ 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки эффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса».

Литература

1. Isaev S.A., Baranov P.A., Leontev A.I., et al. Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimples // *Technical Physics Letters*. 2018. V.44. №5. pp.398-400.
2. Yoon S., Lee S.R., Kim M.J., Kim W.J. Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system // *Energy*. 2016. V. 113. pp. 328-337.
3. Yagov V.V. Heat transfer during cooling of high temperature spheres in subcooled water at different pressures // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 110. pp. 219-230.
4. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Основы конструирования и проектирования промышленных аппаратов. М.: Издательство Юрайт, 2017. 368 с.
5. Лаптева Е.А. Эффективность явлений переноса в газожидкостных средах при десорбции и охлаждении жидкостей. – Казань: Отечество, 2019. 224 с.
6. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование и системный анализ биохимических производств. М.: Лесн. Пром-сть, 1985. 280 с.
7. Гильденблат И.А. Влияние структуры потоков на эффективность работы теплообменных аппаратов. М., МХТИ им Д.И. Менделеева, 1979. 24с.
8. Бобылев В.Н. Тепловой расчет подогревателя с учетом структуры потоков теплоносителя // *Химическая промышленность сегодня*. 2009. № 7. С. 45-50.
9. Pavlenko A.N. Heat transfer and dynamics of transient processes at liquid film flowing on smooth and modified surfaces // *IWHT2019. 25th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control*. 2019. С. 12-52.
10. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Features of heat transfer on a permeable surface in a compressible-gas flow // *Doklady Physics*. 2019. T. 63, №9. С. 371-374.
11. Kovalnogov V.N. Modeling and numerical technique for investigating of turbulent transfer in a non-stationary boundary layer at impacts // *AIP Conference Proceedings*. 2019. T. 2116. №. 1. С. 32-45.
12. Голованчиков А.Б., Воротнева С.Б. Моделирование работы двухтрубного теплообменника с учетом теплодиффузии газового теплоносителя // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. №. 9. С. 58-62.
13. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями. СПб.: Страта. 2016. 214 с.
14. Фарахов Т.М., Афанасьев Е.П., Лаптев А.Г. Экспериментальное исследование теплопередачи масло- вода через стенку в канале с хаотичными металлическими элементами // *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19. № 23. С. 53-55.

15. Фарахов Т.М., Афанасьев Е.П., Лаптев А.Г. Тепловая эффективность канала с интенсификаторами для углеводородных смесей // Труды Академэнерго, 2018. №4 С. 17-27.

Авторы публикации

Лаптев Анатолий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология воды и топлива", Казанский государственный энергетический университет.

Фарахов Тимур Мансурович – канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры "Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий", Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Isaev SA, Baranov PA, Leontev AI, et al. Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimple. *Technical Physics Letters*. 2018;44(5):398-400.
2. Yoon S, Lee SR, Kim MJ., et al. Evaluation of stainless steel pipe performance as a ground heat exchanger in ground-source heat-pump system. *Energy*. 2016;113:328-337.
3. Yagov VV. Heat transfer during cooling of high temperature spheres in subcooled water at different pressures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;110:219-230.
4. Komissarov YuA, Gordeev LS, Vent D.P. *Design principles and design of industrial apparatuses*. Moscow: Urait Publishing House, 2017. 368 p.
5. Lapteva E.A. *Efficiency of transfer phenomena in gas-liquid media during desorption and cooling of liquids*. Kazan: Fatherland, 2019. 223 p.
6. Kafarov VV, Vinarov AYU, Gordeev L.S. *Modelirovanie i sistemnyj analiz biokhimicheskikh proizvodstv*. M.: Lesn. Prom-st', 1985. 280 p.
7. Gildenblat IA. *Influence of the flow structure on the efficiency of heat exchangers*. Moscow, Moscow Institute of Chemical technology Institute. Mendeleev, 1979. 24p.
8. Bobylev VN. Thermal calculation of the heater taking into account the structure of coolant flows. *Chemical industry today*. 2009;7:45-50.
9. Pavlenko AN. Heat transfer and dynamics of transient processes at liquid film flowing on smooth and modified. IWHT2019. *25th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control*. 2019. pp. 12-52.
10. Leont'ev AI, Lushchik VG, Makarova MS. Features of heat transfer on a permeable surface in a compressible-gas flow. *Doklady Physics*. 2019;63(9):371-374.
11. Kovalnogov VN. Modeling and numerical technique for investigating of turbulent transfer in a non-stationary boundary layer at impacts. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2116(1):32-45.
12. Golovanchikov AB, Vorotneva SB. Modeling of a pipe-in-pipe heat exchanger with allowance for thermal diffusion of the gas heat carrier. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015;58(9):58-62.
13. Laptev AG, Farakhov TM, Dudarovskaya OG. *Efficiency of transfer phenomena in channels with random packed layers*. Saint-Petersburg: Strata, 2016. 214 p.
14. Farakhov TM, Afanasiev EP, Laptev AG. Experimental investigation of oil-water heat transfer through the wall in a channel with metal random packing elements. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2016;23:53-55.
15. Farakhov TM., Afanasiev EP, Laptev AG. Thermal efficiency of the channel with intensifiers for hydrocarbon mixtures. *Trudy Akademenergo*, 2018;4:17-27.

Authors of the publication

Anatoly G. Laptev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: tv_t_kgeu@mail.ru.

Timur M. Farakhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: tv_t_kgeu@mail.ru.

Поступила в редакцию

06.02.2020 г.



ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ТОНКОСЛОЙНОЙ И КОЛОНОЧНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
vndan@cnd.edu.vn

Резюме: Большое внимание уделяется рассмотрению причин старения трансформаторного масла под влиянием техногенных и природных факторов. Рассмотрен механизм деструкции бумажной изоляции, в результате которой образуются фурановые соединения, которые попадают в трансформаторное масло и ухудшают его диэлектрические характеристики. Приведены характеристики отечественного трансформаторного масла марки ГК-1, получаемого с использованием технологии гидрокрекинга в среде водорода. В отработанном трансформаторном масле образуются фурановые соединения, которые контролируются с использованием хроматографических методов анализа по стандартам методикам.

Был определен групповой состав трансформаторного масла с использованием тонкослойной хроматографии. В качестве растворителя использовали н-Гексан. Для извлечения из трансформаторного масла фурановых соединений используются различные органические растворители, физико-химические свойства которых приведены в настоящей работе. Установлено, что время удерживания исследуемых сорбатов соответствует повышению температур их кипения для этилацетата, метилэтилкетона и додекана. В случае изопропанола, который имеет близкую температуру кипения с этилацетатом и метилэтилкетонам наблюдается существенное повышение времени удерживания, что связывается с образованием межмолекулярной водородной связи. Установлена зависимость диаметра пятна фурановых веществ от их концентрации в условиях тонкослойной хроматографии на пластиках «Sorbfil». При этом наиболее эффективное разделение характерно для фурфурола. В этом случае хроматографические пятна имеют малые размеры с хорошей четкостью воспроизведения.

Методом колоночной жидкостной хроматографии в восходящем режиме определена зависимость времени удерживания стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя Силохром С-80, которая является параболической. Установлено, что наиболее высокие значения времени удерживания характерны для этоксиэтанола и изопропанола, что согласуется с известными теоретическими положениями жидкостной хроматографии.

Приведены гистограммы влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения, где изопропанол и 2-Этоксиэтанол имеют экстремальные значения. При этом изопропанол, имеющий более низкую температуру кипения чем 2-Этоксиэтанол удерживается на сорбенте сильнее, что связывается с образованием межмолекулярных водородных связей с поверхностными силанольными группами сорбента.

Ключевые слова: трансформаторное масло, сорбент, сорбат, хроматография, растворитель, свойства, время удерживания.

Для цитирования: Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков. Изучение сорбционных свойств органических растворителей в условиях тонкослойной и колоночной хроматографии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 19-26. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-19-26.

STUDY OF THE SORPTION PROPERTIES OF SOLVENTS IN THIN-LAYER AND COLUMN CHROMATOGRAPHY

Vu Ngoc Dan, BF. Novikov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vndan@cnd.edu.vn

Abstract: Much attention is paid to the consideration of the causes of transformer oil aging under the influence of technogenic and natural factors. The paper insulation destruction mechanism is considered, as a result of which furan compounds are formed that enter the transformer oil and worsen its dielectric characteristics. The characteristics of the domestic transformer oil grade GK-1 obtained using the technology of hydrocracking in a hydrogen medium are given. Furan compounds are formed in used transformer oil, which are monitored using chromatographic analysis methods according to standard procedures.

The group composition of transformer oil was determined using thin layer chromatography. As a solvent used n. Hexane. To extract furan compounds from transformer oil, various organic solvents are used, the physicochemical properties of which are given in this work. It was found that the retention time of the studied sorbates corresponds to an increase in their boiling points for ethyl acetate, methyl ethyl ketone and dodecane. In the case of isopropanol, which has a close boiling point with ethyl acetate and methyl ethyl ketone, a significant increase in retention time is observed, which is associated with the formation of an intermolecular hydrogen bond. The dependence of the spot diameter of furan substances on their concentration was established under conditions of thin-layer chromatography on Sorbfil plastics. Moreover, the most effective separation is characteristic of furfural. In this case, the chromatographic spots are small in size with good fidelity.

The ascending mode of column liquid chromatography was used to determine the dependence of the retention time of standard sorbates on the length of the Silyochrome S-80 sorption layer, which is parabolic. It was found that the highest retention times are characteristic of ethoxyethanol and isopropanol, which is consistent with the known theoretical principles of liquid chromatography.

Histograms of the effect of the retention time of standard sorbates on their nature and boiling point, where isopropanol and 2-ethoxyethanol are extreme, are presented. In this case, isopropanol having a lower boiling point than 2-Ethoxyethanol is retained on the sorbent more strongly, which is associated with the formation of intermolecular hydrogen bonds with surface silanol groups of the sorbent.

Key words: transformer oil, sorbent, sorbate, chromatography, solvent, properties, retention time.

For citation: Vu Ngoc Dan, BF. Novikov. Study of the sorption properties of solvents in thin-layer and column chromatography. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):19-26. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-19-26.

Введение и литературный обзор

Как известно силовые трансформаторы эксплуатируются в среде трансформаторного масла, которое является диэлектриком и выполняет функции охлаждающей среды. Современная диагностика трансформаторного электрооборудования основана на своевременном контроле технического состояния трансформаторного масла различными инструментальными методами. При этом определяют развитие таких дефектов трансформаторного электрооборудования как локальные перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции силовых трансформаторов, электрические разряды в изоляционном масле, искрообразование в контактных соединениях, увлажнение изоляции и её загрязнение, попадание воздуха в систему и степень полимеризации бумажно-масляной изоляции и др. [1-4].

Кроме трансформаторного масла в силовом маслонаполненном электрооборудовании в качестве диэлектрика используется бумажная изоляция, которая под влиянием эксплуатационных факторов и окружающей природной среды подвергается деструкции в результате протекания процессов гидролитического и термоокислительного превращения целлюлозы. В результате этого процесса образуются фурановые соединения, которые растворяются в трансформаторном масле и ухудшают его диэлектрические характеристики

[5-7]. Происходит старение трансформаторного масла в результате чего повышается его кислотность, происходит ухудшение электроизоляционных свойств, образуются твёрдые осадки к которым относятся асфальтены, карбены, карбоны, оксикислоты и др. Эти вещества концентрируются на обмотках трансформаторного электрооборудования и затрудняют отвод тепла от технологических деталей силовых трансформаторов.

Твёрдые осадки в трансформаторном масле бывают омыляемые и асфальтовые. Омыляемые осадки растворяются в горячем масле, а при его охлаждении выпадают в осадок. При этом эти осадки реагируют с окислами металлов с образованием соответствующих солей. Асфальтовые осадки являются нейтральными продуктами окисления и полимеризации. Они плохо растворяются в трансформаторном масле, выпадают в осадок и концентрируются на обмотках трансформаторного электрооборудования. В отработанном трансформаторном масле наблюдается появление свободных органических кислот, которые хорошо растворяются в нем [8-10]. При этом в трансформаторном масле образуются термодинамические более устойчивые соединения, что позволяет определять их концентрацию различными инструментальными методами [11-12].

Наиболее распространенное отечественное трансформаторное масло марки ГК-1 производится с использованием технологии гидрокрекинга нефтяного дистиллята под высоким давлением и в среде водорода. В результате этого процесса происходит деструкция нефтяного дистиллята, и образуются парафиновые углеводороды, концентрация которых составляет от 10 до 15%, нафтеновые и циклопарафиновые углеводороды от 60 до 70%, ароматические углеводороды от 15 до 20% и асфальто-смолистые вещества от 1 до 2%. В качестве примесей в трансформаторном масле ГК-1 присутствуют сернистые и азотистые соединения, а также нафтеновые кислоты.

Материалы и методы

Для определения содержания фурановых соединений в трансформаторном масле используются различные варианты хроматографических методов к числу которых относится газо-жидкостная хроматография с использованием насадочных или капиллярных хроматографических колонок [13-14], высокоэффективная жидкость-жидкостная хроматография [15-16], а также тонкослойная хроматография, характеризующаяся простотой выполнения эксперимента, экспрессностью и наглядностью получаемых результатов [17-19]. При этом во всех видах хроматографических методов анализа фурановых производных используются органические растворители, с помощью которых экстрагируются целевые компоненты из трансформаторного масла, а также они используются в качестве стандартных сорбатов при реализации процесса хроматографического разделения индивидуальных компонентов. При этом селективность экстракции и хроматографического разделения зависит от физико-химических свойств используемых сорбатов и определяется их природой.

В настоящей работе были изучены сорбционные свойства индивидуальных органических растворителей (стандартных сорбатов), которые широко используются в технологии извлечения фурановых соединений из трансформаторного масла, а также в качестве селективных сорбатов в тонкослойной и колоночной жидкостной хроматографии.

Экспериментальная часть работы проводилась с использованием тонкослойных пластинок «*Sorbfil*» с флуоресцентным индикатором, позволяющим определять анализируемые компоненты в ультрафиолетовом свете. Использовали также вариант жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме, когда органический растворитель (сорбат) из виалы по капиллярам сорбента, в качестве которого использовали силохром С-80, поднимался по длине сорбционного слоя. Определяли время подъема растворителей (время удерживания) через каждые 10 мм.

Результаты и обсуждения

Предварительно методом радиальной тонкослойной хроматографии на пластинках «*Sorbfil*» определяли групповой состав трансформаторного масла марки ГК-1. С этой целью в центральную область тонкослойной пластинки размером 100x100 мм наносили 1 мкл отработанного трансформаторного масла и затем микро шприцом подавали в эту область сорбат, в качестве которого использовали н-Гексан, являющийся неполярным. В результате этого процесса получили радиальную хроматограмму разделения отработанного трансформаторного масла на ряд зон, соответствующим продуктам деструкции. Для свежего трансформаторного масла таких зон не было обнаружено. Таким образом, на качественном уровне можно провести предварительную оценку трансформаторного масла визуально по виду хроматограммы (рис. 1).

Для извлечения из трансформаторного масла фурановых производных используются органические растворители различной природы. Наиболее часто применяют н-Гексан с добавками ацетонитрила, который относится к прекурсорам, обладает высокой токсичностью для организма человека и поэтому его применение стараются ограничить путём замены менее токсичными сорбатами.

В табл.1 приведены физико-химические свойства стандартных сорбатов используемых в настоящей работе в качестве элюентов для тонкослойной и жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме.

Как видно из табл. 1 в основном время удерживания сорбатов соответствует повышению температур их кипения для этилацетата, метилэтилкетона ин. Додекана. Для изопропанола, который имеет близкую температуру кипения с этилацетатом и метилэтилкетонем наблюдается существенное увеличение времени удерживание, что очевидно связано с образованием межмолекулярной водородной связи спирта с поверхностью тонкослойной пластинки с силикагелем.

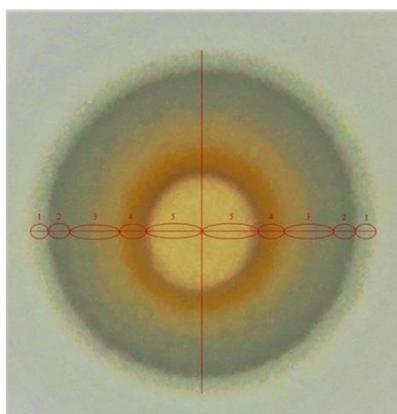


Рис. 1. Радиальная хроматограмма отработанного трансформаторного масла марки ГК-1

Сорбат – н-Гексан, его количество, подаваемого в центр тонкослойной пластинки, «Sorbfil» составляет 20 мкл. Сорбат подавали порциями пять раз по 4 мкл. Концентрация колец: 1 – 3,58%; 2 – 9,26%; 3 – 69,85%; 4 – 14,43%, 5 – 2,89%. Площади колец: 1 – 5см²; 2 – 8см²; 3 – 22см²; 4 – 10см²; 5 – 20см²; Нафтены и Циклоалканы: 69,85%. Ароматические углеводороды: 14,43%. Смолисто-асфальтеновые вещества: 2,89%.

Физико – химические свойства стандартных сорбатов: $T_{кип}$, °С – температура кипения; μ_{20} – дипольный момент; ϵ_{20} – диэлектрическая постоянная; n_{D20} – показатель преломления; d_u^{20} – плотность; mPa_a – вязкость; t_{10} – время удерживания сорбата по длине сорбционного слоя в 10 см Силохроми С-80.

Таблица 1

| № | Сорбат | $T_{кип}$, °С | μ_{20} | ϵ_{20} | n_{D20} | d_u^{20} г/см ³ | mPa_a , 20°С | t_{10} , мин |
|---|----------------|----------------|------------|-----------------|-----------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Ацетон | 56,0 | 2,70 | 21,4 | 1,36 | 0,79 | 0,32 | 8,1 |
| 2 | н-Гексан | 68,0 | 0,05 | 1,90 | 1,42 | 0,66 | 0,32 | 8,8 |
| 3 | Этилацетат | 77,1 | 2,48 | 6,00 | 1,37 | 0,90 | 0,45 | 10,3 |
| 4 | Метилэтилкетон | 79,6 | 2,84 | 19,00 | 1,38 | 0,80 | 0,30 | 15,5 |
| 5 | изо-Пропанол | 82,6 | 1,78 | 18,00 | 1,38 | 0,78 | 1,38 | 58,0 |
| 6 | изо-Бутанол | 108,0 | 1,79 | 18,50 | 1,40 | 0,80 | 3,95 | 65,4 |
| 7 | н-Бутанол | 117,4 | 1,62 | 7,80 | 1,39 | 0,81 | 33,80 | 61,8 |
| 8 | 2-Этоксигтанол | 135,6 | - | - | 1,41 | 0,93 | - | 43,7 |
| 9 | н-Додекан | 216,2 | 0 | 2,00 | 1,42 | 0,75 | 1,38 | 18,4 |

Как известно тонкослойные пластинки «Sorbfil» состоят из алюминиевой или лавсановой подложки, на которую нанесён слой силикагеля, который представляет собой высушенный гель ангидрида кремниевой кислоты SiO₂. Силикагель характеризуется высокой сорбционной ёмкостью с удельной поверхностью от 30 до 600 м²/г с диаметром пор от 0,01 до 0,02 мкм. Поверхность силикагеля покрыта гидроксильными группами, способными вступать в межмолекулярные взаимодействия анализируемыми сорбатами. Для определения эффективности разделения фурановых производных были приготовлены их стандартные растворы различной концентрации в н-Гексане и методом восходящей

тонкослойной хроматографии определен диаметр их пятен при постоянном объёме дозируемой пробы в 1 мкл.

На рис. 2 приведена зависимость диаметра пятен фурановых веществ от их концентрации, которая в исследуемой области является линейной. При этом наиболее эффективное разделение характерно для фурфурола, так как хроматографические пятна имеют малые размеры с хорошей четкостью воспроизведения.

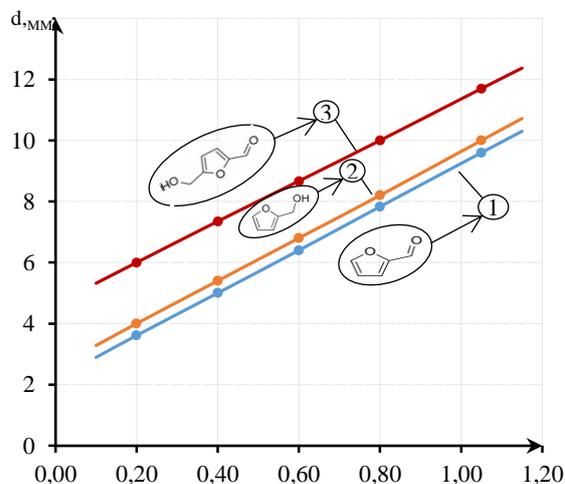


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна фурановых веществ от их концентрации для тонкослойной пластинки «Sorbfil» 1 – Фурфурол; 2 – Фурфуриловый спирт; 3 – Оксиметилфурфурол

Атомы водорода гидроксильной группы спирта взаимодействуют с кислородом SiO_2 поверхности силикагеля, что приводит к возрастанию их времени удерживания. Аналогичная картина характерна для 2-Этоксипропанола, но в данном случае время удерживания меньше чем у изопропанола за счёт стерических затруднений при образовании межмолекулярной водородной связи. Время удерживания алифатических спиртов повышается за счет связывания атома водорода гидроксильной группы спирта с не поделённой электронной парой атома кислорода, OH группы с SiO_2 силикагеля.

На рис. 3 приведена зависимость времени удерживания стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя Силохрома С-80 ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$), который широко применяется в газовой хроматографии в качестве селективного сорбента. Указанная зависимость получена методом жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме.

Как видно из рис.2 характер приведенной зависимости является параболическим. Это связано с тем, что равновесие в системе жидкость – твёрдое тело наступает постепенно. Для всех исследуемых сорбатов кривые имеют близкий угол наклона в начальном участке хроматографической системы. При этом наиболее высокие значения времени удерживания являются характерным для 2-Этоксипропанола и изопропанола, что согласуется с известными положениями жидкостной хроматографии.

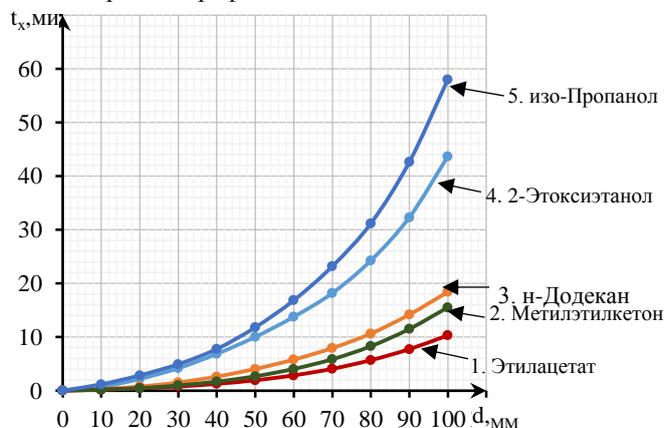


Рис. 3. Зависимость времени удерживание стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя силохрома С-80 ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$)

Стандартные сорбаты: 1 – Этилацетат; 2 – Метилэтилкетон;

3 – н-Додекан;

4 – 2-Этоксипропанол; 5 – изо-Пропанол

На рис. 4 приведена гистограмма влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения. Также как и в предыдущем случае наиболее высокое время удерживания характерно для этоксиэтанола и изопропанола.

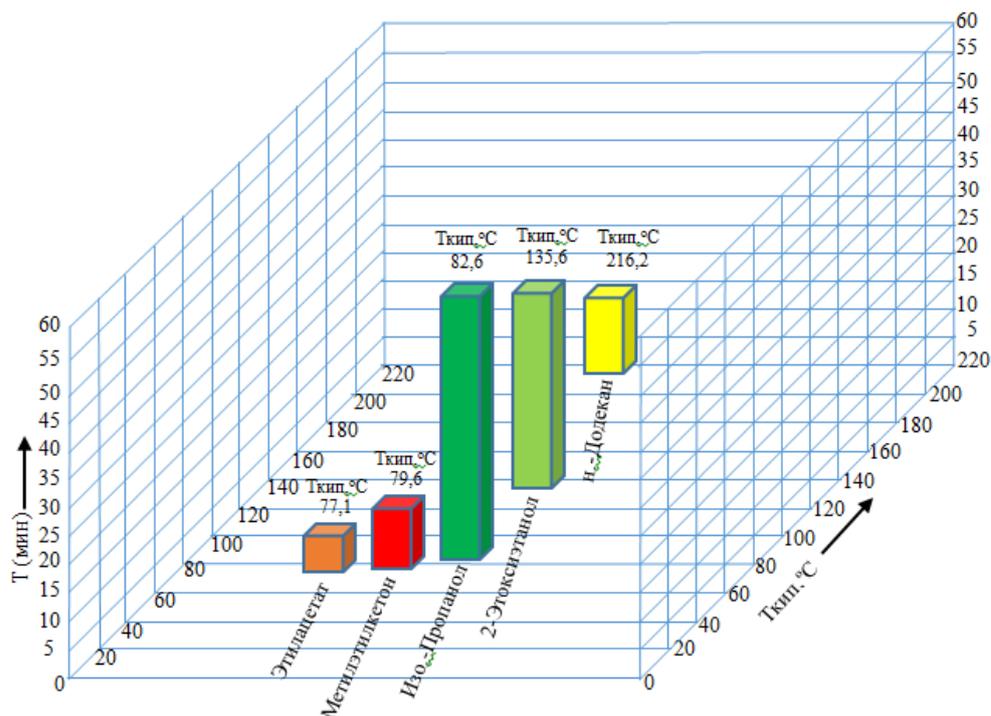


Рис. 4. Гистограмма влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения

Таким образом, для контроля содержания фурановых соединений в трансформаторном масле, хроматографическими методами, перспективным является использование изо-Пропилового спирта, который в условиях жидкостной колоночной хроматографии характеризуется более высоким временем удерживания по отношению к различным, по физико-химическим свойствам, сорбатов. Для оценки степени деградации трансформаторного масла, перспективным является использование метода радиальной тонкослойной хроматографии, который характеризуется экспрессностью анализа и наглядностью получаемых результатов. Полученные экспериментальные данные можно использовать в системе диагностики маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами.

Литература

1. Козлов В.К., Садитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т 20. № 9-10. С. 34-38.
2. Новиков В.Ф. Диагностика маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами // В кн. Новые технологии, материала и оборудования. В 3т. / Под общ. Ред. Абдуллаянова Э.Ю., Шамсутдинова Э.В. Казанский государственный энергетический университет. 2018. Т. 3.С. 138-160.
3. Козлов В.К., Сабитов А.Х., Низамутдинов Б.Р. Исследование процесса старения бумажно-масляной изоляции в видимом диапазоне // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 81-85.
4. Kurakina O.E., Kozlov V.K., Turanova O.A., et al. Research of the Changes in the Structural Group Composition of Transformer Oil During Operation // Problemele energeticii regionale. 2018. N 2. (37).pp. 39-45.
5. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.III. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2018. 328с.
6. Mackenzie E., Crossey J., De Pablo A., et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers // IEEE International symposium on electrical insulation conference. 2010. pp. 1-5.

7. Ding H., Heywood R., Lapworth G., et al. Learning from success and failure in transformer fault gas analysis and interpretation // International conference on reliability of transmission and distribution networks. 2011. pp. 1-6.

8. Krause Ch., Piovan U., Tschudi D. Building reliable AC and DC UHV power transformers dielectric design principles, suitable pressboard insulation and issues related to HVDC testing// Proceeding of international conference on UHV transmission.- Beijing, China. 2009. P. 28-34.

9. Baird P., Herman H., Stevens G. Spectroscopic measurement and analysis of water and oil intratransformer insulating paper// IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. 2006. V. 13. P. 293-308.

10. Zukowski P., Koltunowicz T., Kierczynski K., et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N 4. pp. 2156-2164.

11. Sarathi R., Yadav K.S., Swarna M. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N5. pp. 2513-2521.

12. Bo Qi, Xiaolin Zhao, Chengrong Li, et al. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N4. pp. 2148-2155.

13. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 47-52.

14. РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом жидкостной хроматографии. М.: ОРГЭС. 1995. 12с.

15. РД 34.43.208-95. Методика количественного химического анализа. Определение содержания присадок в энергетических маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М.: ОРГЭС. 1995. 12с.

16. Львов Ю.Н., Писарева Н.А., Сапожников Ю.М. Применение тонкослойной хроматографии при определении микроколичеств фурановых производных в изоляционном масле электрооборудования // Электрические станции. 1993. № 8. С. 48-51.

17. Карташова А.А. Новиков В.Ф. Тонкослойная хроматография как метод контроля фурановых соединений в трансформаторном масле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 138-145.

18. Танеева А.В., Зиятдинова Р.В., Стойков И.И., др. Влияние природы растворителей на сорбционные свойства тонкослойных пластинок «*Sorbfil*», модифицированных наночастицами тиакаликс[4]арен/SiO₂. Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 6. С. 865-871.

Авторы публикации

Ву Нзок Зан – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Kozlov VK, Sadirov AKh. Stepen' polimerizatsii bumazhnoi izolyatsii silovyykh transformatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20(9-10):34-38.

2. Novikov VF. Diagnostika maslonapolnennogo elektrooborudovaniya khromatograficheskimi metodami. *Novye tekhnologii, materiala i oborudovaniya*. ed. Abdullazyanov E.Yu., Shamsutdinov E.V. Kazan State Power Engineering University, Russia. 2018;3:138-160.

3. Kozlov V.K., Sabitov A.Kh., Nizamutdinov B.R. Issledovanie protsessa stareniya bumazhno-maslyanoi izolyatsii v vidimom diapazone. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2015;3-4:81-85.

4. Kurakina OE, Kozlov V.K, Turanova O.A, et al. Research of the Changes in the Structural Group Composition of Transformer Oil During Operation. *Problemele energeticii regionale*. 2018;2(37):39-45.

5. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva A.V. Instrumental'nye metody analiza. Ch.3. *Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya*. Kazan State Power Engineering University 2018. 328 p.

6. Mackenzie E, Crossey J, De Pablo A, et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformer. *IEEE International symposium on electrical insulation conference*. 2010. pp. 1-5.

7. Ding H, Heywood R, Lapworth G, et al. Learning from success and failure in transformer fault gas analysis and interpretation. *International conference on reliability of transmission and distribution networks*. 2011. pp. 1-6.
8. Krause Ch, Piovan U, Tschudi D. Building reliable AC and DC UHV power transformers dielectric design principles, suitable pressboard insulation and issues related to HVDC testing. *Proceeding of international conference on UHV transmission*. Beijing, China. 2009. pp. 28-34.
9. Baird P, Herman H, Stevens G. Spectroscopic measurement and analysis of water and oil in transformer insulating paper. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. 2006;13:293-308.
10. Zukowski P, Koltunowicz T, Kierczynski K, et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(4):2156-2164.
11. Sarathi R, Yadav KS, Swarna M. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(5):2513-2521.
12. Bo Qi, Xiaolin Zhao, Chengrong Li, Hao Wu. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(4):2148-2155.
13. Kartashova AA, Novikov VF. Opredelenie furanovykh soedinenii v transformatornom masle gazokhromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem novykh sorbentov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;1-2:47-52.
15. RD 34.43.206-94. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. *Opredelenie sodержaniya proizvodnykh furana v elektroizolyatsionnykh maslakh metodom zhidkostnoi khromatografii*. M.: ORGRES. 1995. 12 p.
16. RD 34.43.208-95. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. *Opredelenie sodержaniya prisadok v energeticheskikh maslakh metodom vysokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii*. M.: ORGES. 1995. 12 p.
17. L'vov Yu.N, Pisareva NA, Sapozhnikov YuM. Primenenie tonkosloinoi khromatografii pri opredelenii mikrokolichestv furanovykh proizvodnykh v izolyatsionnom masle elektrooborudovaniya. *Elektricheskie stantsii*. 1993;8:48-51.
18. Kartashova AA, Novikov VF. Tonkosloinaya khromatografiya kak metod kontrolya furanovykh soedinenii v transformatornom masle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;1-2:138-145.
19. Taneeva AV, Ziatdinova RV, Stoikov I, et al. Vliyanie prirody rastvoritelei na sorbtionnye svoistva tonkosloinykh plastinok «Sorbfil», modifi- tsirovannykh nanochastitsami tiakaliks[4]aren/SiO₂. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2018. T. 18. № 6. S. 865-871.

Authors of the publication

Vu Ngoc Dan – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: vndan@cnd.edu.vn.

Vyacheslav F. Novikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

17.04.2020 г.



ОБЗОР И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, А ТАКЖЕ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИХ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С.С. Костинский

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

Резюме: В качестве объекта для проведения экспериментальных исследований был выбран преобразователь частоты марки ACS150. На основе выполненных измерений сделан вывод, что в спектральном составе силы тока, потребляемого преобразователем частоты, помимо токов основной гармонической составляющей преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих также присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше. Также, исходя из полученных данных, можно утверждать, что при уменьшении частоты управления скоростью вращения двигателя и величины загрузки преобразователя частоты увеличивается количество пульсаций на осциллограмме силы тока, как результат наблюдаются увеличение значений высших гармонических составляющих и рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока. Основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, в то же время гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению.

Приведен краткий обзор технических решений, направленных на повышение электромагнитной совместимости асинхронного частотно-регулируемого привода. В частности, отмечены такие решения, как повышение количества полупроводниковых ключей, используемых в инверторах, совершенствование режимов управления, применение специальных разделительных трансформаторов, пассивных (резонансных) и активных фильтров.

Ключевые слова: качество электрической энергии, высшие гармонические составляющие тока, преобразователь частоты, асинхронный электрический двигатель, пассивный фильтр, активный фильтр, биполярный транзистор с изолированным затвором, полевой транзистор с изолированным затвором, запираемый тиристор, силовой модуль высшей степени интеграции.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20188.

Для цитирования: Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 27-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42.

REVIEW AND RESULTS OF STUDIES OF THE HARMONIC COMPOSITION OF THE CURRENT CONSUMED BY LOW-POWER FREQUENCY CONVERTERS, AS WELL AS METHODS AND DEVICES TO REDUCE THEIR NEGATIVE IMPACT ON POWER SUPPLY SYSTEMS

SS. Kostinskiy

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, mirovingen1987@mail.ru

Abstract: The ACS150 frequency Converter was chosen as the object for experimental research. On the basis of the measurements it is concluded that in the spectral composition of current drawn by the frequency Converter, in addition to currents the main harmonic component is dominated by currents 5, 7, 11, 13, and 17th harmonics, i.e. harmonic components of odd non-multiple of three. Currents 3, 9 and 15 th harmonic components are also present in the spectral composition, but their value is much smaller. Also, based on the data obtained, it can be argued that with a decrease in the frequency of motor speed control and the load value of the frequency Converter, the number of pulsations on the current waveform increases, as a result, there is an increase in the values of the higher harmonic components and an increase in the value of the total harmonic components of the current. The main contribution to the increase in the index of the total harmonic components of the amperage with a decrease in the load of the frequency Converter and the output frequency of the motor speed control is made by odd harmonic components of the amperage multiple of three, at the same time harmonic components of the amperage non-multiple of three, namely the 5th and 7th order, are not subject to change.

A brief review of technical solutions aimed at improving the electromagnetic compatibility of asynchronous frequency-controlled drive is given. In particular, such solutions as increasing the number of semiconductor switches used in inverters, improving control modes, the use of special separation transformers, passive (resonant) and active filters are noted.

Keywords: quality of electric energy, harmonic or high frequency component of the current, frequency converter, asynchronous electric motor, passive power filter, active power filter, insulated gate bipolar transistor (IGBT), metal oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFET), gate turn off (GTO), super integrating power modules (SIPM).

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-38-20188.

For citation: Kostinskiy SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):27-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42.

Введение и литературный обзор

Ежегодное производство электрических двигателей во всем мире составляет около 7 млн. На их долю потребления приходится примерно 70 % вырабатываемой электрической энергии [1]. Их функция – преобразование электрической энергии в механическую. Для управления процессом преобразования применяются регулируемые и нерегулируемые электроприводы. Регулируемый электропривод достаточно широко используется в энергетике, промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве [2]. Использование регулируемого электропривода способствует снижению потребления электрической энергии и как следствие его применение является одним из важных мероприятий по энергосбережению [3]. При этом достигается не только снижение потребления электрической энергии, но и увеличивается ресурс оборудования [2].

Более половины вырабатываемой электрической энергии потребляется асинхронными электрическими двигателями [4]. Электроприводы постоянного тока повсеместно вытесняются регулируемыми электроприводами переменного тока [2, 5]. В связи с этим увеличивается количество предприятий, которые внедряют частотно-регулируемый привод в целях повышения энергосбережения и как следствие уменьшения стоимости выпускаемой продукции и повышения ее конкурентоспособности [4, 6].

Автоматизированный электропривод широко используется и имеет большие перспективы эффективного применения с асинхронными электродвигателями [7, 8].

В последнее время преимущества и лидерство асинхронного частотно-регулируемого привода определяются как совершенствованием и повышением эффективности самих асинхронных двигателей, так и созданием и внедрением устройств силовой электроники и интеллектуальных систем управления и контроля, обеспечивающих требуемые статические, динамические характеристики, энергосбережение и высокие энергетические показатели [6]. Это можно объяснить достижениями в развитии силовой полупроводниковой и микропроцессорной технике, которые в совокупности позволяют реализовывать различные алгоритмы управления асинхронными двигателями имеющими ряд преимуществ перед двигателями постоянного тока [2].

Совершенствование технических показателей преобразователей частоты является основой технического прогресса [9]. Основными элементами преобразователей частоты являются силовые полупроводниковые преобразователи [3]. Основной вектор развития преобразователей частоты связан с усовершенствованием силовых полупроводниковых приборов и микроконтроллеров, применяемых для их управления [10]. Применение современных достижений в области микроконтроллеров способствует увеличению функциональных возможностей и более гибкой настройке способов управления преобразователей частоты [4].

В связи со сложившейся тенденцией направленной на повышение энергоэффективности частотно-регулируемых электроприводов асинхронных электродвигателей и снижения их негативного влияния на питающую сеть наиболее интенсивно развиваются электрические приводы, имеющие наиболее экономичные способы управления [11]. Регулируемые электроприводы производят с применением полупроводниковых ключей, которые являются полностью управляемыми. В таких электроприводах изменение величины напряжения, фазы и частоты достигается за счет использования широтно-импульсной модуляции в совокупности с системой управления [12]. Совершенствование силовой части регулируемых электроприводов осуществляется за счет применения современных выпускаемых полупроводниковых приборов, таких как: *MOSFET*, *IGBT*, *GTO*, *IGCT* и др. [4, 11].

Преобразователи частоты, выполняемые с применением *IGBT*, являются наиболее распространенными, т.к. выполняют наилучшее преобразование по сравнению с остальными полупроводниковыми ключами, при этом имеют площадь кристалла меньше, чем у *MOSFET* [3, 13]. В ближайшее время основную конкуренцию преобразователям, выполненным с использованием *IGBT*, составят преобразователи выполненные с применением *CSTBT*, *EST*, *IEGT*, *CIGBT* и др. [3]. По оценкам специалистов можно прогнозировать, что *IGBT* будут применяться для преобразователей частоты мощностью до 1000 кВт с допустимым напряжением до 8 кВ [1, 14].

К существенным достоинствам *MOSFET* по сравнению с *IGBT* можно отнести значительную перегрузочную способность и меньшее изменение сопротивления в открытом состоянии между стоком и истоком [13]. Однако при указанных достоинствах существует и недостаток, связанный с необходимостью установки для них устройств и схем ограничения перенапряжения между затвором и истоком. Исходя из сведений, приведенных в литературных источниках, можно сделать заключение, что *MOSFET* будут применяться в преобразователях частоты с мощностью до 10 кВт и напряжением до 1,5 кВ [1].

GTO являются запираемыми тиристорами, оптимизированными для низких потерь в проводящем состоянии. Область применения *GTO* не ограничивается использованием в регулируемых электроприводах. Они применяются при изготовлении систем бесперебойного электропитания, компенсаторов и др. Однако, широкое применение *GTO* в электроприводах сдерживается использованием *IGBT* и *MOSFET*, между которыми и разворачивается основная конкуренция. Вследствие этого область использования *GTO* ограничена электроприводами, рассчитанными на несколько десятков киловатт. Перспективы дальнейшего развития *GTO* связаны с созданием *HDGTO* и *IGCT*, для которых не требуется защитных цепей от перенапряжения, и которые обладают большей надежностью при переменной нагрузке [15].

Перспективными являются работы направленные на создание интегрированных интеллектуальных модулей (*IPM*). Их отличительной чертой является объединение силовых полупроводниковых ключей и элементов их управления на одном кристалле [13]. Быстрыми темпами растет применение *IPM* в системах электропривода [16]. По оценкам специалистов наибольшая область применения *IPM* – это сектор маломощного (приблизительно до 4 кВт) электропривода [17]. Дальнейшее развитие *IPM* должно привести к созданию *SIPM*

(*Super IPM*), которые будут обладать функцией самозащиты от перегрузок, и включать в свой состав выпрямитель, корректор коэффициента мощности и тормозной ключ с управлением [1].

Преобразователи частоты в большинстве случаев состоят из выпрямителя, фильтра и инвертора, который представляет собой автономный инвертор напряжения (АИН) [18]. Силовые ключи, входящие в конструкцию преобразователей, являются источниками помехоэмиссии высших гармонических составляющих тока и напряжения [19, 20]. Исследования преобразователей частоты, выполненные в работе [18], свидетельствуют об увеличении значений высших гармонических составляющих в выходных напряжении и токе при подключении преобразователей к сети [21]. Появление гармонических составляющих тока, связано с отличием закона управления автономного инвертора тока (АИН) от синусоидального. Следовательно, независимо от законов управления АИТ и АИН будут наблюдаться высшие гармонические составляющие в потребляемом токе и напряжении [22]. Таким образом, широкое и повсеместное применение преобразователей частоты в системах электроснабжения негативно сказывается на качестве электрической энергии [23 – 25]. Поэтому одним из важнейших критериев при оценке эффективности преобразователей частоты является обеспечение их электромагнитной совместимости [4]. В указанном контексте также следует указать, что частотно-регулируемые приводы малой мощности являются наиболее массово востребованными [10]. На их долю приходится примерно 2/3 рынка электроприводов [2].

Приведенный обзор из литературных источников свидетельствуют о необходимости исследования спектров гармонических составляющих тока в сетях с преобразователями частоты малой мощности, работающими при различных режимах загрузки, в целях обеспечения их электромагнитной совместимости.

Материалы и методы

В качестве объекта для проведения настоящего исследования выбран преобразователь частоты, производимый фирмой *ABB* марки *ACS150*. Для реализации эффективных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости в сетях 0,38 кВ необходимо исследовать гармонический состав потребляемого преобразователем частоты тока [26 – 28]. Один из эффективных путей получения такого рода информации – экспериментальные исследования [27, 29]. Осциллограммы, полученные в результате, позволяют анализировать спектральный состав потребляемого тока, после разложения их в ряд Фурье [26, 30]. Результаты экспериментальных измерений, получены с помощью анализатора качества электрической энергии *Metrel*, внесенного в Государственный реестр средств измерения под номером 52911-13 и прошедшего метрологическую поверку (свидетельство о поверке № 206.1-22463). Указанный анализатор качества электрической энергии имеет внешнее программное обеспечение (*PowerView*), позволяющее выполнять загрузку измеренных данных на персональный компьютер, просмотр, анализ и печать полученных результатов. При этом спектральный состав, рассчитанный на основе полученных осциллограмм, и результаты, полученные с помощью программного обеспечения анализатора качества электрической энергии, практически совпадают.

Результаты

На рис. 1 показаны результаты экспериментальных измерений осциллограммы мгновенных значений силы тока фазы *L1* преобразователя частоты *ACS150* при разных выходных частотах управления скоростью вращения двигателя. Далее приведены результаты выполненных исследований только для фазы *L1*, однако аналогичные результаты были получены и для фаз *L2* и *L3*.

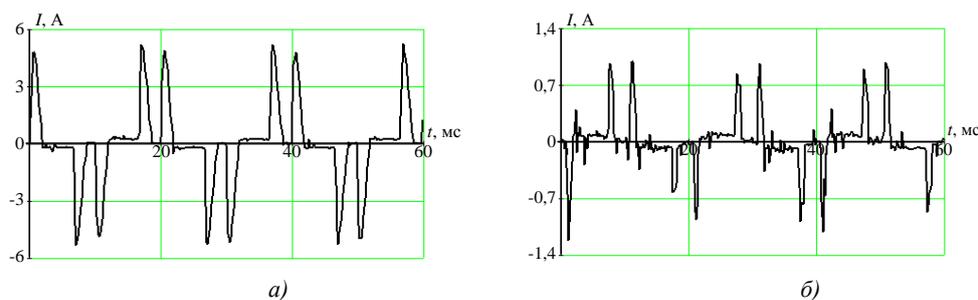


Рис. 1. Осциллограмма мгновенных значений силы тока фазы *L1* преобразователя частоты *ACS150* при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: *a* – 50 Гц; *б* – 10 Гц

Осциллограммы мгновенных значений силы тока при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя 50 и 10 Гц имеют схожий вид. Однако визуально заметно увеличение пульсаций при низкой частоте управления скоростью вращения двигателя, что косвенно свидетельствует об увеличении на низких частотах суммарного коэффициента гармонических составляющих силы тока, потребляемого частотно-регулируемым приводом. Для более детального анализа измеренных осциллограмм мгновенных значений силы тока получен их спектральный состав с использованием разложение в ряд Фурье (рис. 2).

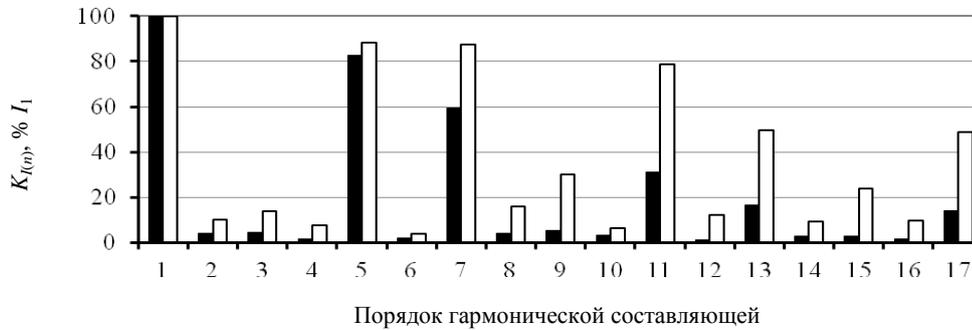


Рис. 2. Амплитудный спектр силы тока в фазе L1 преобразователя частоты ACS150 при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: ■ – 50 Гц; □ – 10 Гц

В виду того, что величина загрузки преобразователя частоты динамически изменяется в процессе его эксплуатации, необходимо рассмотреть изменение величины суммарных гармонических составляющих силы тока при изменении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя (рис. 3, 4).

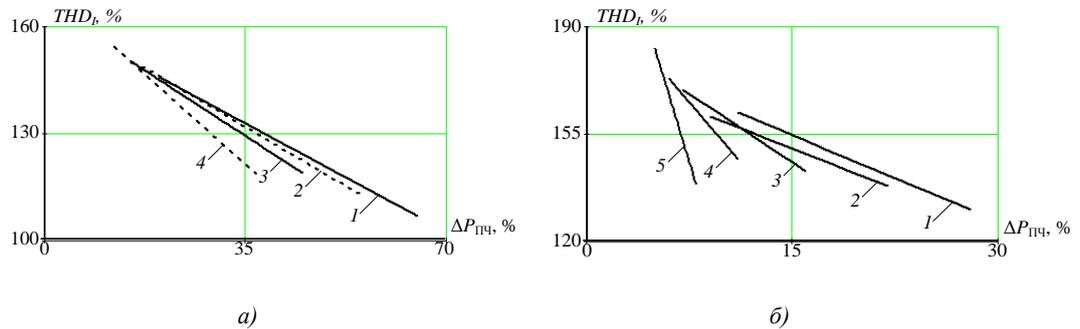


Рис. 3. Зависимости изменения значений суммарных гармонических составляющих силы тока в фазе L1 при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя:

а – 1 – 50 Гц; 2 – 45 Гц; 3 – 40 Гц; 4 – 35 Гц;
б – 1 – 30 Гц; 2 – 25 Гц; 3 – 20 Гц; 4 – 15 Гц; 5 – 10 Гц

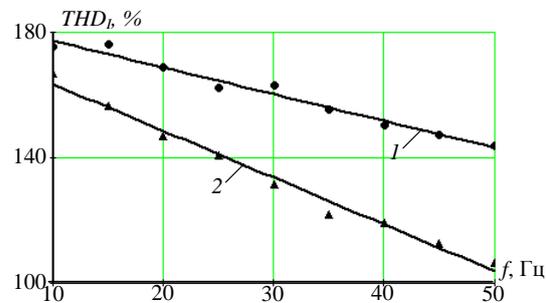


Рис. 4. Зависимости изменения значений суммарных гармонических составляющих силы тока в фазе L1 при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 1): 1 – min граничное значение $\Delta P_{ПЧ}$; 2 – max граничное значение $\Delta P_{ПЧ}$

Таблица 1

Изменение значений суммарных гармонических составляющих тока в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

| f , Гц | Диапазон загрузки преобразователя частоты, % | Интервал изменения значений THD_1 при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, % | | Относительное изменение величины THD , % |
|----------|--|---|---------|--|
| | | min | max | |
| 50 | 19,947 – 65,038 | 143,958 | 106,473 | 35,231 |
| 45 | 17,611 – 54,318 | 147,218 | 112,643 | 30,703 |
| 40 | 15,12 – 44,359 | 150,478 | 119,242 | 26,29 |
| 35 | 12,951 – 35,593 | 155,381 | 121,964 | 27,397 |
| 30 | 11,145 – 27,781 | 163,041 | 131,412 | 24,132 |
| 25 | 9,487 – 21,04 | 162,121 | 140,906 | 15,031 |
| 20 | 7,881 – 15,418 | 168,767 | 146,972 | 14,839 |
| 15 | 6,573 – 10,877 | 176,007 | 156,517 | 12,47 |
| 10 | 5,542 – 7,403 | 175,425 | 166,858 | 5,842 |

Для более детального анализа порядка гармонических составляющих, влияющих на увеличение показателя суммарных гармонических составляющих тока, при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя необходимо рассмотреть зависимости изменения значений отдельных нечетных гармонических составляющих тока кратных и некратных трем, преобладающих в спектре мгновенных значений силы тока (рис. 5, 6).

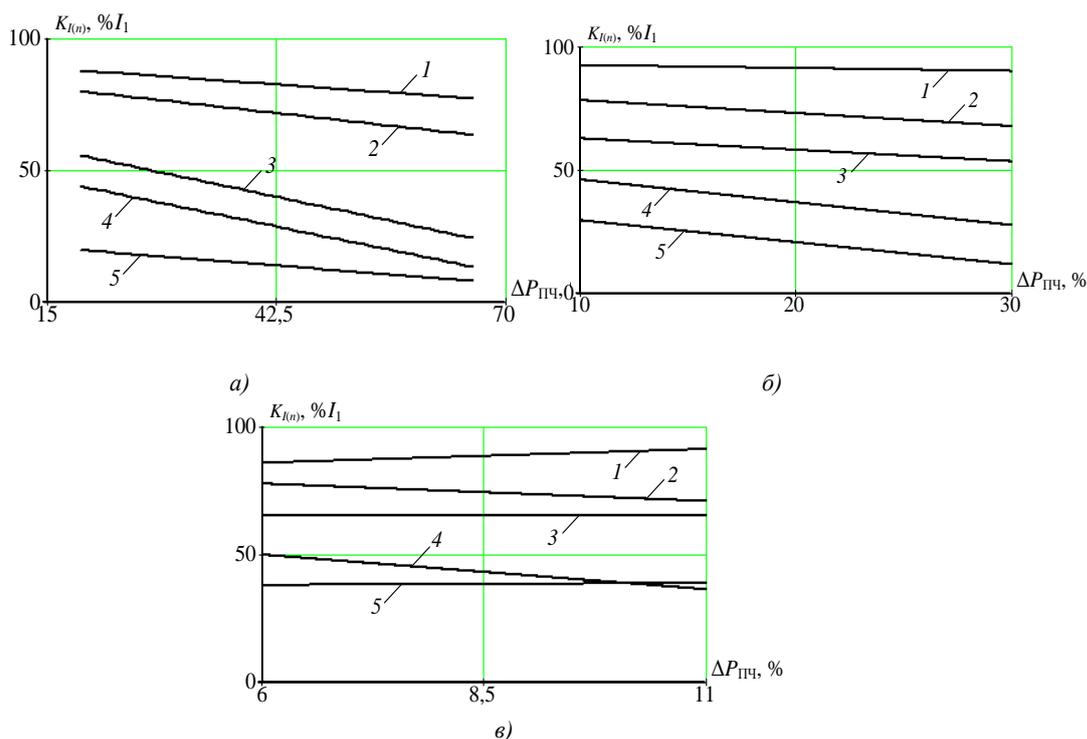


Рис. 5. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ некратных трем при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 10 Гц.

Порядок гармонических составляющих: 1 – 5; 2 – 7; 3 – 11; 4 – 13; 5 – 17

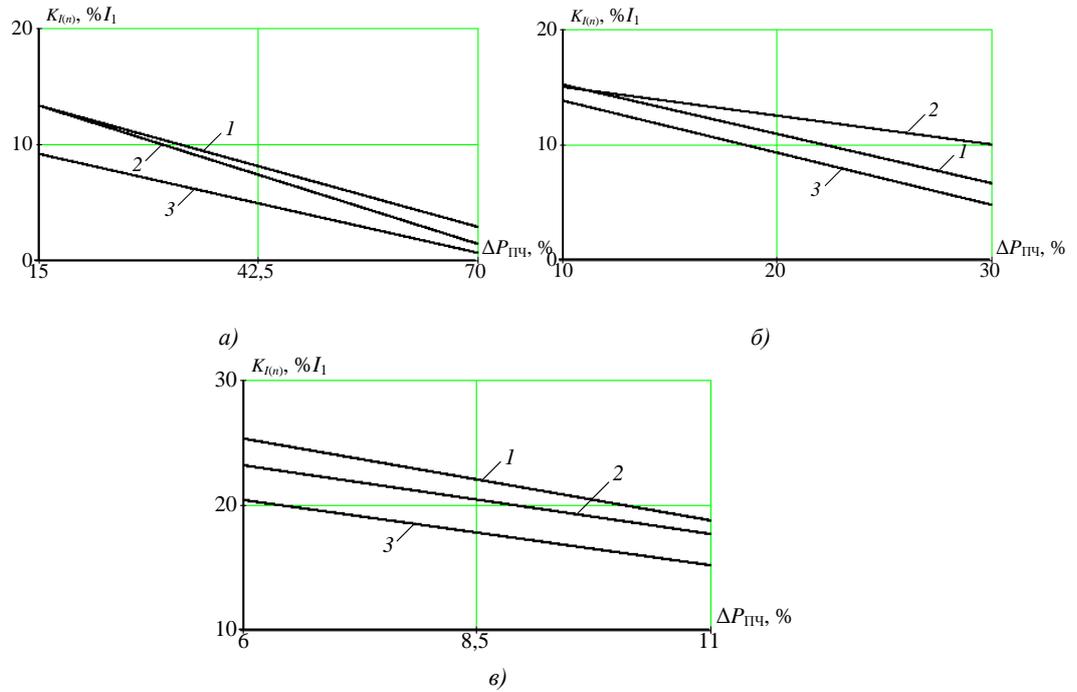


Рис. 6. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ кратных трем при изменении величины загрузки преобразователя частоты ACS150, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при выходной частоте управления скоростью вращения двигателя: а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 10 Гц. Порядок гармонических составляющих: 1 – 3; 2 – 9; 3 – 15

На рис. 7 приведены зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока кратных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при min граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 2.

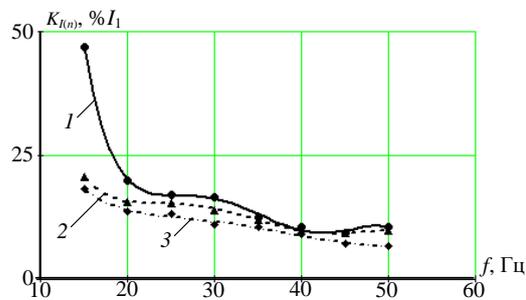


Рис. 7. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ кратных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 5-го порядка, при min граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 2):
1 – порядок гармонической составляющей – 3; 2 – порядок гармонической составляющей – 9;
3 – порядок гармонической составляющей – 15.

Таблица 2

Изменение значений 3-й, 9-й и 15-й гармонических составляющих силы тока кратных трем в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

| Порядок гармонической составляющей | $f, \text{Гц}$ | Диапазон загрузки преобразователя частоты, % | Интервал изменения величины $K_{I(n)}$, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, % | | Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, % |
|------------------------------------|----------------|--|--|-------|---|
| | | | min | max | |
| 3 | 50 | 19,947 – 65,038 | 10,549 | 2,808 | 7,741 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 9,397 | 4,389 | 5,008 |

Продолжение таблицы 2

| | | | | | |
|----|----|-----------------|--------|--------|--------|
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 10,64 | 6,324 | 4,316 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 12,493 | 5,886 | 6,608 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 16,538 | 5,815 | 10,723 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 17,182 | 8,536 | 8,646 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 20,042 | 9,417 | 10,624 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 46,862 | 39,987 | 6,876 |
| 9 | 50 | 19,947 – 65,038 | 9,894 | 2,477 | 7,418 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 9,263 | 4,725 | 4,538 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 9,86 | 6,801 | 3,059 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 12,013 | 6,838 | 5,174 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 14,06 | 8,78 | 5,28 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 15,427 | 9,486 | 5,942 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 15,66 | 11,146 | 4,514 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 20,697 | 18,565 | 2,133 |
| 15 | 50 | 19,947 – 65,038 | 6,776 | 1,293 | 5,483 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 7,242 | 1,987 | 5,256 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 9,018 | 3,155 | 5,863 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 10,545 | 3,533 | 7,012 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 11,009 | 4,635 | 6,374 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 13,282 | 5,584 | 7,698 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 13,723 | 8,542 | 5,181 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 18,192 | 11,412 | 6,78 |

На рис. 8 приведены зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока 5-го и 7-го порядка при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 3.

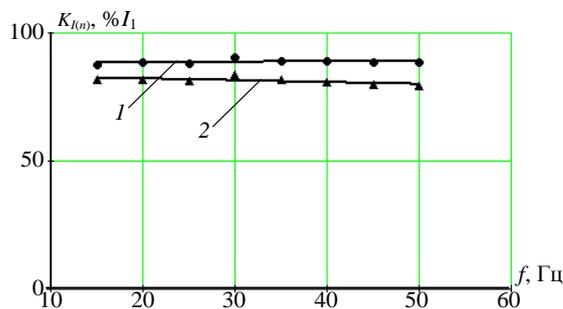


Рис. 8. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе L1 нечетных трех при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 3):

1 – порядок гармонической составляющей – 5; 2 – порядок гармонической составляющей – 7;

Таблица 3

Изменение значений 5-й и 7-й гармонических составляющих силы тока в фазе L1 при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

| Порядок гармонической составляющей | f , Гц | Диапазон загрузки преобразователя частоты, % | Интервал изменения величины $K_{I(n)}$, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, % | | Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, % |
|------------------------------------|----------|--|--|------------|---|
| | | | <i>min</i> | <i>max</i> | |
| 5 | 50 | 19,947 – 65,038 | 88,518 | 79,379 | 9,139 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 88,611 | 81,64 | 6,971 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 88,902 | 83,743 | 5,159 |

| | | | | | |
|----|----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 89,137 | 84,752 | 4,386 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 90,511 | 86,374 | 4,137 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 87,848 | 88,136 | -0,288 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 88,502 | 87,304 | 1,199 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 87,549 | 87,829 | -0,279 |
| 7 | 50 | 19,947 – 65,038 | 79,145 | 61,943 | 17,203 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 79,956 | 66,013 | 13,943 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 80,76 | 69,51 | 11,25 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 81,669 | 71,14 | 10,529 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 83,722 | 75,462 | 8,26 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 81,475 | 79,06 | 2,416 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 81,687 | 79,715 | 1,972 |
| 15 | 6,573 – 10,877 | 81,552 | 81,114 | 0,438 | |

На рис. 9 приведены зависимости изменения значений гармонических составляющих силы тока некртные трем, а именно 11-го, 13-го и 17-го порядка, при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты в соответствии с табл. 4.

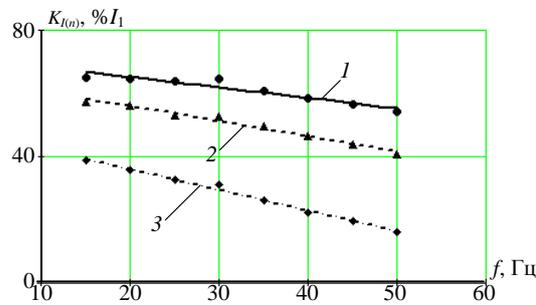


Рис. 9. Зависимости изменения значений коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ некртных трем при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, аппроксимированные полиномом 1-го порядка, при *min* граничном значении диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150 (табл. 4):

1 – порядок гармонической составляющей – 11; 2 – порядок гармонической составляющей – 13; 3 – порядок гармонической составляющей – 17

Таблица 4

Изменение значений 11-й, 13-й и 17-й гармонических составляющих силы тока в фазе $L1$ при изменении величины выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты ACS150

| Порядок гармонической составляющей | f , Гц | Диапазон загрузки преобразователя частоты, % | Интервал изменения величины $K_{I(n)}$ при граничных значениях диапазона загрузки преобразователя частоты, % | | Абсолютное изменение величины $K_{I(n)}$ в заданном диапазоне изменения загрузки преобразователя частоты, % |
|------------------------------------|----------|--|--|------------|---|
| | | | <i>min</i> | <i>max</i> | |
| 11 | 50 | 19,947 – 65,038 | 54,045 | 27,009 | 27,036 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 56,693 | 31,965 | 24,728 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 58,273 | 37,452 | 20,821 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 60,764 | 40,11 | 20,654 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 64,577 | 47,25 | 17,327 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 63,999 | 53,333 | 10,666 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 64,722 | 58,076 | 6,646 |
| 13 | 50 | 19,947 – 65,038 | 40,638 | 15,152 | 25,485 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 43,863 | 18,566 | 25,297 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 46,645 | 23,151 | 23,494 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 49,554 | 25,501 | 24,053 |

| | | | | | |
|----|----|-----------------|--------|--------|--------|
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 52,602 | 34,204 | 18,399 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 53,156 | 40,904 | 12,253 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 56,025 | 45,829 | 10,196 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 57,42 | 49,575 | 7,845 |
| 17 | 50 | 19,947 – 65,038 | 16,251 | 11,028 | 5,223 |
| | 45 | 17,611 – 54,318 | 19,58 | 9,451 | 10,129 |
| | 40 | 15,12 – 44,359 | 22,258 | 8,384 | 13,874 |
| | 35 | 12,951 – 35,593 | 26,261 | 7,561 | 18,7 |
| | 30 | 11,145 – 27,781 | 31,192 | 11,993 | 19,198 |
| | 25 | 9,487 – 21,04 | 32,583 | 17,293 | 15,29 |
| | 20 | 7,881 – 15,418 | 35,868 | 22,558 | 13,31 |
| | 15 | 6,573 – 10,877 | 38,705 | 29,289 | 9,416 |

Обсуждение

По результатам полученного амплитудного спектра мгновенных значений силы тока, потребляемого частотно-регулируемым приводом, можно однозначно сказать, что уровень высших гармонических составляющих при низкой частоте управления скоростью вращения двигателя довольно высокий. Спектральный состав силы тока так же показывает, что помимо основного преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих так же присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше. Это можно объяснить тем, что входные выпрямители этих частотно-регулируемых приводов – трехфазные. Остальными гармоническими составляющими можно пренебречь [31, 32]. Указанные результаты соответствуют приведенным в литературных источниках [6, 23, 33 – 35] для других марок частотно-регулируемых приводов малой мощности.

На основании графических зависимостей (см. рис. 3, 4), а также данных табл. 1 можно сделать вывод, что при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя наблюдается рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока. Отмеченную закономерность можно объяснить следующим. Для регулирования выходной частоты управления скоростью вращения двигателя применяется ШИМ. При уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя уменьшаются время импульса и амплитуда силы тока, в результате величина силы тока не успевает достичь номинального значения, после чего следует безтоковая пауза, и величина силы тока снижается до нуля раньше окончания безтоковой паузы, как следствие появляется провал потребляемого тока, после которого следует бросок тока в виде следующего импульса. Все это приводит к характерным пульсациям, хорошо заметным на осциллограмме мгновенных значений силы тока, приведенной на рис. 1 б, искажению формы потребляемого частотно-регулируемым приводом тока и, как итог, к увеличению показателя суммарных гармонических составляющих силы тока.

Учитывая приведенные на рис. 5, 6 зависимости, можно сделать заключение, что основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, о чем свидетельствует больший, чем для нечетных гармонических составляющих силы тока не кратных трем, характер изменения в сторону увеличения, что отражено на рис. 6.

Гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению как при низких значениях выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, так и при уменьшении загрузки преобразователя частоты, что хорошо заметно на рис. 5 в. При этом, гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 11-го, 13-го и 17-го порядка, менее подвержены изменению, чем кратные трем, как при низких значениях выходной частоты управления скоростью вращения двигателя, так и при уменьшении загрузки преобразователя частоты, что хорошо заметно на рис. 9 и по данным табл. 4.

В целях обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты и, как следствие, снижения величины гармонических составляющих силы тока, генерируемых ими в питающую сеть при различных режимах нагрузки, в литературных источниках предлагается ряд технических решений. Их можно разделить на конструкционные,

применение которых связано с изменением конструкции или режимом управления самого преобразователя частоты, и решения, связанные с использованием специальных устройств.

К наиболее популярному конструкционному решению относится повышение количества полупроводниковых ключей, используемых в инверторах [36, 37]. Известно, что увеличение числа полупроводниковых ключей приводит к уменьшению гармонических составляющих тока [38]. Например, применение 12-пульсного выпрямителя позволяет полностью подавить 5-ю и 7-ю гармонические составляющие в питающем токе [39]. Однако для реализации указанного решения в литературных источниках [40, 41] также предлагается использовать схемы инверторов с 12 и 18 полупроводниковыми ключами, а в [42] – с 24 и 36 ключами. В то же время увеличение количества полупроводниковых ключей в инверторах приводит к увеличению их стоимости и повышению сложности серийного изготовления. К конструкционным решениям также можно отнести совершенствование режимом управления преобразователя частоты, т.е. различные методы модуляции. В [43, 44] предложены новые методы для реализации ШИМ, направленные на то, чтобы создать желательную амплитуду и форму волны напряжения, тем самым уменьшить гармонические искажения.

К решениям, связанным с использованием специальных устройств, в первую очередь относится применение специальных разделительных трансформаторов с обмотками «треугольник-звезда». Они позволяют эффективно бороться с гармоническими составляющими, кратными трем [39]. В [42] предлагается последовательно с каждым тиристорным мостом использовать автотрансформатор, обмотки которого соединены по схеме «зигзаг». Немаловажным решением так же является использование пассивных (резонансных) фильтров [45, 46]. Например, подключение пассивного фильтра на входе 6-пульсного выпрямителя при 100% нагрузке обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармонических искажений до величины 8-10 % [39]. Но в то же время пассивным фильтрам присущи недостатки, обусловленные их конструкцией, устранить которые можно применяя активные фильтры, реагирующие на изменение уровня высших гармонических составляющих при динамических процессах работы электроприводов [34, 47].

Все вышеперечисленные технические решения, безусловно, приводят к снижению величины гармонических составляющих силы тока, генерируемых преобразователями частоты в питающую сеть.

Выводы

1. Широкое применение преобразователей частоты в системах электроснабжения приводит к искажению синусоидальности тока, потребляемого ими из питающей электросети, и, как следствие, к повышению гармонических составляющих тока и напряжения. В спектральном составе силы тока, потребляемого преобразователем частоты, помимо основной преобладают токи 5, 7, 11, 13 и 17-й гармонических составляющих, т.е. нечетные гармонические составляющие не кратные трем. Токи 3, 9 и 15-й гармонических составляющих также присутствуют в спектральном составе, но их величина значительно меньше.

2. При уменьшении частоты управления скоростью вращения двигателя, при помощи преобразователя частоты, увеличивается количество пульсаций на осциллограмме силы тока, как результат наблюдается увеличение значений высших гармонических составляющих. Особый рост отмечен для коэффициентов нечетных гармонических составляющих силы тока кратных трем.

3. При уменьшении величины загрузки преобразователя частоты наблюдается рост значения показателя суммарных гармонических составляющих силы тока.

4. Основной вклад в увеличение показателя суммарных гармонических составляющих силы тока при уменьшении величины загрузки преобразователя частоты и выходной частоты управления скоростью вращения двигателя вносят нечетные гармонические составляющие силы тока кратные трем, в то же время гармонические составляющие силы тока не кратные трем, а именно 5-го и 7-го порядка, не подвержены изменению.

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: от настоящего к будущему // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 6-12.
2. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 46-48.

3. Евсеев Ю.А., Ковалев В.Д., Сурма А.М. Состояние и перспективы развития Российской полупроводниковой элементной базы силовой электроники // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2005. № 5. С. 2-14.
4. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода // *Новости электротехники*. 2005. № 2 (32).
5. Das B., Fancan M., Kasari P.R., Chakrabarti A. Comparison of different PWM-VSI fed 3 Φ im based on modulation index and switching frequency // *International conference on electrical, electronics, signals, communication and optimization (EESCO)*. 2015.
6. Kupparillai R., Subramanian P., Vetrivel D. Single phase to three phase conversion with suppressed input current distortions for induction motor drive // *IEEE International conference on technological advancements in power and energy: exploring energy solutions for an intelligent power grid (TAP Energy)*. 2018. pp. 1-4.
7. Козярук А.Е. Эффективный промышленный электропривод сегодня // *Сборник трудов IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*. 2016. С. 56-58.
8. Arya K., Mini V.P., Mayadevi N., Harikumar R. Power quality enhancement of VSI fed induction motor drive // *International CET conference on control, communication, and computing*. 2018. pp. 28-32.
9. Багаев А.А. Современное состояние и перспективы развития электропривода // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2003. № 1 (9). С. 57-60.
10. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств // *Силовая электроника*. 2009. № 23. С. 4-7.
11. Макаров В.Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 6. С. 109-120.
12. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. № 4. Т. 14. С. 96-105.
13. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // *Силовая электроника*. 2010. № 25. С. 8-14.
14. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // *Современные технологии автоматизации*. 2004. №2. С. 20-30.
15. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // *Силовая электроника*. 2010. № 24. С. 6-11.
16. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: вчера, сегодня, завтра // *Силовая электроника*. 2006. № 1. С. 4-7.
17. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электроприводов малой мощности // *Силовая электроника*. 2005. № 4. С. 30-35.
18. Чаплыгин Е.Е. Анализ искажений выходного напряжения и сетевого тока матричного преобразователя частоты // *Электричество*. 2007. № 11. С. 25-38.
19. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.3 // *Силовая электроника*. 2010. № 28. С. 12-17.
20. Makhubele J.W., Ogudo K.A. Analysis on modulation techniques of an AC drive with respect to harmonic content and efficiency // *International conference on intelligent and innovative computing applications (ICONIC)*. 2019.
21. Salsabil I.T., Ahmed M.R. Design and Implementation of a single phase symmetrical hybrid sinusoidal pulse width modulated inverter for improve performance // *International conference on advancement in electrical and electronic engineering (ICAEEE)*. 2018.
22. Hoque M.R., Islam R., Islam K., Alam M.J. Performance analysis of AC-DC converter based self excited DC shunt motor using single tuned passive filter // *10-th International conference on electrical and computer engineering (ICECE)*. 2018. pp. 325-328.
23. Беляев В.Л., Радимов С.Н. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // *Електромеханічні І енергозберігаючі системи*. 2012. № 3 (19). С. 469-471.
24. Panchbhai A., Prajapati N., Parmar S. Harmonic mitigation in AC motor using multi-pulse rectifier // *IEEE International WIE conference on electrical and computer engineering*. 2017. pp. 1-4.
25. Ayala M., Gonzalez O., Rodas J., Gregor R., Rivera M. Predictive control at fixed switching frequency for a dual three-phase induction machine with Kalman filter-based rotor estimator // *IEEE International conference on automatic (ICA-ACCA)*. 2016.
26. Хажиев Р.А. Исследование гармонического состава потребляемого тока светодиодных драйверов с использованием программируемого источника напряжения GW INSTEK APS-71102 //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. № 4. Т. 13. С. 139-144.

27. Лещинская Т.Б., Таранов М.М. Исследование токов эмиссии бытовых электроприемников // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 2. С. 54-61.

28. Авербух М.А., Лескина Я.В., Коржов Д.Н., Чередников А.В. Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете Matlab 7.12 // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 4. С. 57-62.

29. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока осветительных электроприемников // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 25-32.

30. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока бытовых электроприемников, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 8. С. 29-39.

31. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Экспериментальные исследования гармонического состава тока и напряжения на шинах станций управления установками электроцентробежных насосов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2015. № 1. С. 203-208.

32. Плацанский Л.А., Зарипов Ш.У. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 2. С. 61-66.

33. Ольховский В.Я., Мятаж Т.В., Найков С.Ю. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2016. № 1 (30). С. 84-97.

34. Авербух М.А., Лимаров Д.С. Обеспечение электромагнитной совместимости крановых частотных электроприводов с электрическими сетями промышленных предприятий: монография – Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 185 с.

35. Ковалева Н.А., Денчик Ю.М., Аникин В.В. Источники гармоник тока и напряжения в электротехническом комплексе добычи нефти из глубинных скважин // Омский научный вестник. 2015. № 137. С. 151-154.

36. Prasad S.V.S., Singh R.R., Somasekhar V.T., et al. Performance evaluation of an induction motor drive with direct torque control for open-end winding and cascaded three-level topologies // International conference on computer applications in electrical engineering - recent advances. 2018. pp. 1-6.

37. Narsale D., Dhamse S.S. A review on different multilevel topology used in AC drives to mitigate the total harmonic distortion // IEEE International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC). 2018. pp. 230-236.

38. Abdollahi R. Harmonic reduction using a novel multipulse AC-DC converter // World journal of engineering. 2018. V. 15. Is. 4. pp. 520-530.

39. Барутсков И.Б., Вдовенко С.А., Цыганков Е.В. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты // Главный энергетик. 2011. № 6. С. 5-15.

40. Gupta C., Varshney A., Verma N., et al. THD analysis of eleven level cascaded H-bridge multilevel inverter with different types of load using in drives applications // 2-nd IEEE International conference on advances in computing and communication engineering (ICACCE). 2015. pp. 355-359.

41. Swamy M.M. An electronically isolated 12-pulse autotransformer rectification scheme to improve input power factor and lower harmonic distortion in variable-frequency drives // IEEE Transactions on industry applications. 2015. V. 51 (5). pp. 3986-3994.

42. Singh B., Gairola S., Chandra A., et al. Zigzag connected autotransformer based controlled AC-DC converter for pulse multiplication // IEEE International symposium on industrial electronics. 2007. pp. 889-894.

43. Aarniovuori L., Kärkkäinen H., Niemelä M., et al. PWM power distribution and switching frequency analysis in motor drives // Industrial Electronics Conference (IECON). 2016. pp. 4356-4361.

44. Sayed M.A., Takeshita T., Iqbal A. New PWM technique for three-to-five phase matrix converter with high efficiency and low THD // IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC). - 2015. pp. 3217-3224.

45. Boonseng C., Rapeepornpat B., Suksawat D., et al. Design and installation of passive power filter for grid-connected solar rooftop applications at industrial plants // Grand international conference and exposition Asia. 2019. pp. 724-729.

46. Chaudhari P.S., Patil S.L. Reduction in harmonics of BLDC motor drive using controlled LC filter // Electric Power Components and Systems. 2018. V. 46. Is. 14-15. pp. 1686-1703.

47. Balasubramaniam S., Gunasekaran S., Ramasamy S., et al. Design and implementation of solar power fed permanent magnet synchronous motor with improved DC-DC converter and power quality

improvement using shunt active filter for reducing vibration in drive for industrial applications // Journal of vibroengineering. 2019 V. 21. Is. 2. pp. 507-525.

Автор публикации

Костинский Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроснабжение и электропривод, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.

References

1. Lancov V, Eranosyan S. Intelligent power electronics: from the present to the future. *Power electronics*. 2009;22:6-12.
2. Kolpakov A. Prospects of electric drive development. *Power electronics*. 2004;1:46-48.
3. Evseev YuA, Kovalev VD, Surma AM. State and prospects of development of the Russian semiconductor element base of power electronics. *Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*. 2005;5:2-14.
4. Lazarev G. High-voltage converters for frequency-controlled electric drive. *Electrical engineering news*. 2005; 2 (32).
5. Das B, Fancon M, Kasari PR, Chakrabarti A. Comparison of different PWM-VSI fed 3 im based on modulation index and switching frequency. *International conference on electrical, electronics, signals, communication and optimization (EESCO)*, 2015.
6. Kupppillai R, Subramanian P, Vetrivel D. Single phase to three phase conversion with suppressed input current distortions for induction motor drive. *IEEE International conference on technological advancements in power and energy: exploring energy solutions for an intelligent power grid (TAP Energy)*, 2018. pp. 1-4.
7. Kozyaruk AE. Efficient industrial electric drive today. *Proceedings of the IX international (XX all-Russian) conference on automated electric drive AEP-2016*. 2016. pp. 56-58.
8. Arya K, Mini VP, Mayadevi N, et al. Power quality enhancement of VSI fed induction motor drive. *International CET conference on control, communication, and computing*. 2018. pp. 28-32.
9. Bagaev AA. Current state and prospects of electric drive development. *Bulletin of Altai state agrarian University*. 2003;1 (9):57-60.
10. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. *Power electronics*, 2009;23:4-7.
11. Makarov VG. Analysis of the current state of the theory and practice of asynchronous electric drive. *Bulletin of Kazan technological University*. 2011;6:109-120.
12. Nikolaev AA, Kornilov GP, Hramshin TR, Nikiforov G, et al. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of metallurgical enterprises. *Bulletin of Magnitogorsk state technical University. G. I. Nosova*. 2016;4 (14):96-105.
13. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 3. *Power electronics*. 2010; 25:8-14.
14. Florencov S. Current state and forecast of development of power electronics devices. *Modern automation technologies*. 2004;2:20-30.
15. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 2. *Power electronics*. 2010;24:6-11.
16. Lancov V, Eranosyan S. Intelligent power electronics: yesterday, today, tomorrow. *Power electronics*. 2006;1:4-7.
17. Bashkirov V. International Rectifier intelligent power modules for low power drives. *Power electronics*. 2005;4:30-35.
18. ЧНaplygin EE. Analysis of distortions of output voltage and mains current of matrix frequency converter. *Electricity*. 2007;11:25-38.
19. Lancov V, Eranosyan S. Electronic component base of power devices. Pt 4.3. *Power electronics*. 2010;28:12-17.
20. Makhubele JW, Ogudo KA. Analysis on modulation techniques of an AC drive with respect to harmonic content and efficiency. *International conference on intelligent and innovative computing applications (ICONIC)*, 2019.
21. Salsabil IT, Ahmed M.R. Design and Implementation of a single phase symmetrical hybrid sinusoidal pulse width modulated inverter for improve performance. *International conference on advancement in electrical and electronic engineering (ICAEEE)*. 2018.
22. Hoque M.R, Islam R, Islam K, et al. Performance analysis of AC-DC converter based self excited DC shunt motor using single tuned passive filter. *10-th International conference on electrical and computer engineering (ICECE)*. 2018, pp. 325-328.

23. Belyaev VL, Radimov SN. Harmonic composition of mains current of frequency drives with pulse width modulation. *Electromechanical and energy saving systems*. 2012;3 (19):469-471.
24. Panchbhai A, Prajapati N, Parmar S. Harmonic mitigation in AC motor using multi-pulse rectifier. *IEEE International WIE conference on electrical and computer engineering*, 2017. pp. 1-4.
25. Ayala M, Gonzalez O, Rodas J, Gregor R, et al. Predictive control at fixed switching frequency for a dual three-phase induction machine with Kalman filter-based rotor estimator. *IEEE International conference on automatic (ICA-ACCA)*. 2016.
26. Hazhiev RA. Investigation of the harmonic composition of the current consumption of led drivers using a programmable voltage source GW INSTEK APS-71102. *Bulletin of South Ural state University. Series: Computer technology, control, electronics*. 2013;4 (13):139-144.
27. Leshchinskaya TB, Taranov MM. Study of emission currents of household electric receivers. *Bulletin of the Federal state educational institution of higher professional education «Moscow state agroengineering university. V.P. Goryachkina»*. 2009;2:54-61.
28. Averbuh MA, Leskina YaV, Korzhov DN, et al. Analysis of electrodynamic processes and electromagnetic compatibility of frequency electric drive in Matlab 7.12 package. *News of universities. Electromechanics*. 2014;4:57-62.
29. Kostinskij SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current of lighting electrical receivers. *Industrial power engineering*. 2018;9:25-32.
30. Kostinskij S.S. Review and results of studies of the harmonic composition of the current of household electrical receivers, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems. *Industrial power engineering*. 2018;8:29-39.
31. Kovalev AYu, Kuznecov EM, Anikin VV. *Experimental studies of the harmonic composition of current and voltage on the tires of control stations of electric centrifugal pumps*. 2015;1:203-208.
32. Plashchanskij LA, Zaripov Sh.U. Influence of higher harmonics on the state of electric networks. *Proceedings of higher educational institutions. Mining journal*. 2010;2:61-66.
33. Ol'hovskij V.Ya, Myatezh TV, Nayaksov SYu. Investigation of the influence of higher harmonics of small nonlinear consumers on the operation of the network up to 1000 V. *Reports of the Academy of Sciences of the higher school of the Russian Federation*. 2016;1(30):84-97.
34. Averbuh MA, Limarov DS. *Ensuring electromagnetic compatibility of crane frequency drives with electrical networks of industrial enterprises*. Belgorod, Publishing house of BSTU, 2009;22:6-12.
35. Kovaleva NA, Denchik YuM, Anikin VV. Sources of current and voltage harmonics in the electrotechnical complex of oil production from deep wells. *Omsk scientific bulletin*, 2015;137:151-154.
36. Prasad SV, Singh RR, Somasekhar VT, et al. Performance evaluation of an induction motor drive with direct torque control for open-end winding and cascaded three-level topologie. *International conference on computer applications in electrical engineering - recent advances*. 2018. pp. 1-6.
37. Narsale D, Dhamse SS. A review on different multilevel topology used in AC drives to mitigates the total harmonic distortion. *IEEE International conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC)*. 2018, pp. 230-236.
38. Abdollahi R. Harmonic reduction using a novel multipulse AC-DC converter. *World journal of engineering*. 2018;15 (4):520-530.
39. Barutskov IB, Vdovenko SA, Cygankov E.V. Harmonic distortions during operation of frequency converters. *Chief power*. 2011;6:5-15.
40. Gupta C, Varshney A, Verma N, et al. THD analysis of eleven level cascaded H-bridge multilevel inverter with different types of load using in drives applications . *IEEE International conference on advances in computing and communication engineering (ICACCE)*. 2015, pp. 355-359.
41. Swamy MM. An electronically isolated 12-pulse autotransformer rectification scheme to improve input power factor and lower harmonic distortion in variable-frequency drives. *IEEE Transactions on industry applications*. 2015;51 (5):3986-3994.
42. Singh B, Gairola S, Chandra A, et al. Zigzag connected autotransformer based controlled AC-DC converter for pulse multiplication. *IEEE International symposium on industrial electronics*. 2007, pp. 889-894.
43. Aarniovuori L, Kärkkäinen H, Niemelä M, et al. PWM power distribution and switching frequency analysis in motor drives . *Industrial Electronics Conference (IECON)*, 2016. pp. 4356-4361.
44. Sayed MA, Takeshita T, Iqbal A. New PWM technique for three-to-five phase matrix converter with high efficiency and low THD. *IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*, 2015, pp. 3217-3224.
45. Boonseng C, Rapeepornpat B, Suksawat D, et al. Design and installation of passive power filter for grid-connected solar rooftop applications at industrial plants. *Grand international conference and exposition Asia*. 2019, pp. 724-729.
46. Chaudhari P.S., Patil S.L. [Reduction in harmonics of BLDC motor drive using controlled LC filter] *Electric Power Components and Systems*. 2018; 46(14-15):1686-1703.

47. Balasubramaniam S, Gunasekaran S, Ramasamy S., et al. Design and implementation of solar power fed permanent magnet synchronous motor with improved DC-DC converter and power quality improvement using shunt active filter for reducing vibration in drive for industrial applications. *Journal of vibroengineering*. 2019;21 (2):507-525.

Authors of the publication

Sergey S. Kostinskiy – Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),Novochoerkassk, Russia.
Email: mirovingen1987@mail.ru.

Поступила в редакцию

03.12.2019г.



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С МОНОПОТРЕБИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Ю.А. Секретарев, Д.А. Меняйкин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия
Denmen1305@mail.ru

Резюме: Надежность электроснабжения потребителей является важной задачей в процессе передачи и распределения электрической энергии. В работе предложена методика оценки последствий отказов электроснабжения монопотребителей электрической энергии на примере нефтяной компании и смежного электросетевого предприятия. Уникальность разработанной методики заключается в возможности достоверного расчета надежности электроснабжения сложных разветвленных электрических сетей без учета детальной схемы электроснабжения. Повышена точность расчетов за счет применения данных непосредственно исследуемой энергосистемы, учитывающих специфику и условия эксплуатации конкретного оборудования, вместо среднестатистической информации. Произведена классификация отказов на основные причины в электрических сетях нефтедобывающего предприятия крайнего севера, что позволило разработать мероприятия по повышению уровня надежности электроснабжения.

Ключевые слова: надежность энергосистемы, отказ элемента, ущерб у потребителя и электросетевого предприятия, электроснабжение, распределительные электрические сети.

Для цитирования: Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 43-50 doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-43-50.

FEATURES OF CALCULATIONS OF CONSEQUENCES OF FAILURES OF POWER SUPPLY IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH THE MONOCONSUMER OF ELECTRIC ENERGY

YA. Sekretarev, DA. Menyainkin

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
Denmen1305@mail.ru

Abstract: Reliability of power supply of consumers is an important task in the process of transmission and distribution of electric energy. The paper proposes a method for assessing the consequences of power failures of monoconsumers of electric energy on the example of an oil company and an adjacent power grid company. The uniqueness of the developed technique lies in the possibility of reliable calculation of reliability of power supply of complex branched electric networks without taking into account the specific scheme of power supply. The accuracy of calculations is increased due to the use of data directly studied power system, taking into account the specifics and operating conditions of specific equipment, instead of the average information. Classification of failures on the main reasons in electric networks of the oil-producing enterprise of the far North that allowed to develop actions for increase of level of reliability of power supply is made.

Keywords: The reliability of the power system, the failure of an element, the damage of the consumer and the power grid systems, electricity, the electrical distribution system

For citation: Sekretarev YA., Menyainkin D. Features of calculations of consequences of failures of power supply in distribution networks with the monoconsumer of electric energy // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):43-50. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-43-50.

Введение

Разработанные на сегодняшний день схемные методы расчета надежности электроснабжения основаны на общей статистике отказов элементов схемы электроснабжения и не принимают во внимание местные факторы для конкретной схемы электроснабжения и условий эксплуатации оборудования [1,2,3]. В случае сложной закольцованной системы электроснабжения с множеством точек потребления корректно оценить надежность этой системы не представляется возможным. Зачастую схема электроснабжения выполнена таким образом, что некоторые точки потребления приходится учитывать несколько раз при расчете надежности, что некорректно. Зарубежные исследователи [4–8] сталкиваются с той же проблемой.

В условиях реального электроснабжения между производителями электрической энергии и потребителями есть еще одно звено. Это распределительные электрические сети. Эту работу выполняют отдельные предприятия, которые распределяют и передают электрическую энергию от станций генерации до конечного потребителя. В основном из-за аварий или ошибочного действия персонала именно в этом звене происходит сбой в электроснабжении конечных потребителей. С другой стороны, именно надежные и грамотно спроектированные распределительные сети продолжают поставлять электрическую энергию при аварии на одной из генерирующих станций. Логично, что специфика работы таких предприятий имеет свои характерные особенности, которые необходимо учитывать при расчетах.

В первую очередь, тут необходимо ввести и разделить такие понятия, как время восстановления элемента и продолжительность отключения. Так как при выходе из строя генератора или сопутствующего элемента на генерирующей станции возникает дефицит мощности, и недоотпуск электроэнергии длится до полного восстановления элемента, что обусловлено дополнительными существенными финансовыми затратами. Конфигурация распределительных сетей изначально проектируется таким образом, чтобы обеспечить закольцованность схемы электроснабжения потребителя. Даже потребитель 3 категории электроснабжения до отпайки тупиковой ветви или одного силового трансформатора запитан по сложной само резервирующей схеме. Т.е. при выходе из строя любого из элементов цепи, есть возможность запитать потребителя с помощью другого участка распределительной сети, тогда электроснабжение потребителя восстанавливается гораздо быстрее, чем восстановление поврежденного элемента. Технически это реализуется с помощью работы автоматики или ручным переключением оперативно-выездной бригады. В отличие от времени восстановления элемента, продолжительность отключения практически не зависит от вида повреждения, так как неважно вышел из строя коммутационный аппарат, кабельные линии (КЛ) или воздушные линии (ВЛ), поскольку время переключения потребителя на другой источник зависит от наличия и правильности срабатывания автоматики или от оперативности бригады ОВБ. Поэтому это характеристика не элемента, а конкретной энергосистемы.

Поэтому для оценки надежности электроснабжения распределительных сетей необходимо применять иной подход [9]. Поскольку надежность электроснабжения напрямую связана с ущербом от перерывов электроснабжения, то справедливо будет оценивать именно ущербы от перерывов электроснабжения. По сути, ущерб в данном случае является стоимостным показателем надежности электроснабжения. Чем чаще и тяжелее аварии в сетях, тем соответственно и выше показатель ущерба [10].

Величина ущерба от перерывов электроснабжения потребителей за определенный период времени зависит от количества сбоев в электроснабжении, их продолжительности и стоимости затрат на ликвидацию последствий. Время восстановления и стоимость ремонта силового трансформатора значительно выше, чем ликвидация таких аварий, как обрыв провода на ВЛ или раскол изолятора.

Еще одной особенностью данного звена энергосистемы является то, что существуют электросетевые предприятия с различными видами потребителей. Монопотребители электрической энергии (нефтедобывающие компании, промышленно-логистические парки и т.д.) и распределительные электрические сети с большим количеством различных потребителей (города).

При перерывах в электроснабжении помимо электросетевого предприятия может возникать ущерб у потребителя. В том случае, когда электросетевое предприятие направлено на электроснабжение городов [11], тогда величину ущерба от перерывов в электроснабжении у потребителей, как показал анализ в [12], посчитать практически невозможно и нецелесообразно. Потому что при огромном количестве потребителей различных категорий электроснабжения коммунально-бытового и офисных секторов ущерб от перерывов электроснабжения не возмещается.

В случае, когда распределительные сети имеют закрытый характер и направлены на работу единого потребителя с множеством точек потребления электрической энергии и обширной географией расположения, необходимо учитывать не только составляющие ущерба в электросетевом предприятии, но и у потребителя [12,13]. Далее в работе будет исследовано электросетевое предприятие с монопотребителем электрической энергии.

Для этого было рассмотрено электросетевое предприятие, которое обслуживает 5 нефтедобывающих месторождений. Название предприятия и точное территориальное расположение месторождений по просьбе владельцев разглашению не подлежит. Климатические условия работы предприятия – крайний север.

Материалы и методы

Для анализа аварийности в распределительных электрических сетях были предоставлены сводки аварий, произошедших в электрических сетях нефтедобывающего предприятия с 2008 года по июнь 2018 года.

За рассматриваемый интервал времени для энергосистемы целесообразнее всего принимать промежуток времени равный одному году. Ключевые показатели, которыми можно оперировать в дальнейшем это количество аварий в единицу времени (параметр потока отказов) и средняя продолжительность отключения [14]. Среднюю продолжительность отключения для наглядности и удобства расчетов целесообразнее измерять в часах.

Изучив журналы аварий, было произведено разделение событий на группы. Для дальнейшего анализа все повреждения были разделены на три вида:

- погодные условия – гроза, ветер, выдавливание грунта, падение деревьев, обледенение проводов;
- дефект/поломка – выход из строя оборудования, старение изоляции, обрыв, заводские и монтажные дефекты;
- постороннее воздействие – порыв проводов сторонней техникой, другие вмешательства третьих лиц.

Из предоставленных сводок было рассчитано среднее время отключения для каждого года. А также общее количество отключений с разделением по видам аварий. Полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные по повреждениям электротехнического оборудования

| год | Количество отключений | Погодные условия | Дефект/поломка оборудования | Постороннее воздействие | Среднее время отключения, ч |
|------|-----------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 2008 | 37 | 6 | 12 | 19 | 4,86 |
| 2009 | 37 | 11 | 14 | 12 | 16,4 |
| 2010 | 36 | 10 | 6 | 20 | 3,7 |
| 2011 | 20 | 5 | 1 | 14 | 5,5 |
| 2012 | 23 | 9 | 6 | 8 | 3,55 |
| 2013 | 18 | 5 | 6 | 7 | 2,4 |
| 2014 | 29 | 9 | 7 | 13 | 5 |
| 2015 | 24 | 7 | 5 | 12 | 3,8 |
| 2016 | 13 | 6 | 4 | 3 | 2,5 |
| 2017 | 20 | 9 | 6 | 5 | 7 |
| 2018 | 7 | 2 | 5 | 0 | 5,9 |
| | $N_{cp}=25.7$ | $N_{cp}=7.7$ | $N_{cp}=6.7$ | $N_{cp}=11.3$ | $T_{cp}=5.51$ |

Для наглядности на рис.1 приведено соотношение между видами повреждения по каждому году.

Исходя из предоставленных данных по аварийным ситуациям и произведенных по ним расчетов и классификации выяснилось, что большая часть повреждений, а соответственно и перерывов в электроснабжении объектов происходит по причине посторонних воздействий. 11 из 25 аварий в год происходит по причине внешних

воздействий третьих лиц. Неорганизованные и бесконтрольные работы строительной, погрузочной и транспортировочной техники.

Возможные методы по снижению посторонних воздействий:

- ужесточение ответственности и возложение убытков на виновников повреждения электроэнергетического оборудования;
- координация работ между энергетическими и хозяйственными предприятиями в охранных зонах ВЛ;
- присутствие электротехнического персонала при проведении работ вблизи ВЛ и другого оборудования;
- организация движения автотранспорта и спецтехники в местах пересечения дорог с ВЛ;
- изменение маршрутов движения техники.

Следующий вид повреждений, который оказывает существенное влияние на уровень надежности электроснабжения нефтедобывающего предприятия – это погодные условия. 8 из 25 аварий в год.

Методы по снижению погодных воздействий:

- переход на самонесущие изолированные провода (СИП);
- своевременная подрубка деревьев в охранной зоне ВЛ;
- повышение уровня грозозащиты.

Наименьшее влияние на надежность электроснабжения, 6 из 25 случаев, оказывает поломка оборудования.

Методы по снижению выхода из строя оборудования:

- своевременный контроль, профилактика и ремонт оборудования;
- рациональное использование ресурсов оборудования (не превышать номинальные значения элементов системы электроснабжения);
- реконструкция устаревшего оборудования;
- применение материалов, соответствующих суровым и тяжелым климатическим условиям.



Рис. 1. Виды повреждений

Средняя продолжительность отключения составила 5,51 ч. В 2009 году наблюдались частые аварии с большим промежутком времени отключения, что сильно отличается от других годов. Поэтому для большей точности справедливо будет не учитывать этот год, тогда средняя продолжительность отключения составит 4,42 ч. Учитывая специфику работы и тяжелые погодные условия — это время составляет ниже среднего по РФ. Снизить данный показатель надежности электроснабжения можно за счет резервирования потребителей электроснабжения и закольцованности схем электроснабжения. Также необходимо обеспечить запас материалов для восстановительных работ и высококвалифицированный штат сотрудников, рассредоточенный по всем районам электроснабжения [15].

Помимо того, что данный анализ выявил наиболее частые виды повреждений и способы борьбы с ними, также среднюю продолжительность отключения и количество повреждений можно использовать для расчета ущербов от перерывов электроснабжения, что позволит планировать и организовывать более правильно аварийно-восстановительные и ремонтные работы на последующие периоды. Выбрать наиболее оптимальные меры по повышению надежности и оценить эффективность принятых мероприятий по снижению аварийности.

Обладая данными по аварийным ситуациям непосредственно в исследуемых распределительных электрических сетях, не привязываясь к конкретным схемам можно рассчитать составляющую ущерба от перерывов в электроснабжении у электросетевого предприятия, что упрощает задачу по сравнению с расчетом полной схемы электроснабжения.

Расчет ущерба производится по следующей формуле:

$$Y = Y_{np} + Y_n \quad (1)$$

где Y_{np} – прямой ущерб, рассчитывается следующим образом:

$$Y_{np} = w \cdot I \quad (2)$$

где w – среднее количество отключений в год; I – издержки на восстановление электроснабжения, Y_n – ущерб от недоотпуска электрической энергии

$$Y_n = T_0 \cdot \Pi \cdot P \cdot w \quad (3)$$

где T_0 – средняя продолжительность отключения; Π – тариф на передачу электрической энергии; P – средняя мощность отключения потребителя.

Рынок электрической энергии устроен таким образом, что тарифы на услуги по передаче электрической энергии устанавливаются в соответствии основами ценообразования в области регулируемых тарифов в электроэнергетике и правилами государственного регулирования цен в электроэнергетике. Соответственно, для каждой электросетевой компании устанавливается свой тариф на передачу электрической энергии исходя из множества факторов. Исследуемое предприятие получило тариф на передачу электрической энергии, составляющий 1,1 руб./кВт*ч.

Тогда ущерб от перерывов в электроснабжении внутри сетевого предприятия составит, руб.:

$$Y_n = 5,51 \cdot 1,1 \cdot 431 \cdot 25,7 = 67135,88 \text{ руб.}$$

$$Y = 402847,5 + 67135,88 = 469983,38 \text{ руб.}$$

Рассчитать ущерб нефтяному предприятию от перерывов в электроснабжении можно перемножив среднее количество отключений на среднюю величину ущерба от перерыва электроснабжения. Так как данное электросетевое предприятие обслуживает нефтедобывающие месторождения, то критерием ущерба от перерыва в электроснабжении у потребителя электрической энергии является сброс нефти. Данные по сбросам нефти приведены в табл.2.

Таблица 2

Сброс нефти при аварийных отключениях электрической энергии

| Год | Количество отключений | Сброс нефти, т |
|------|-----------------------|----------------|
| 2008 | 37 | 1949,25 |
| 2009 | 37 | 1838,64 |
| 2010 | 36 | 238 |
| 2011 | 20 | 131 |
| 2012 | 23 | 220,87 |
| 2013 | 18 | 146,5 |
| 2014 | 29 | 663,2 |
| 2015 | 24 | 140,68 |
| 2016 | 13 | 193,8 |
| 2017 | 20 | 772,34 |
| 2018 | 7 | 269,84 |
| | $N_{cp}=25,7$ | $Cp=596,738$ |

Тогда ущерб от перерывов электрической энергии для нефтедобывающего предприятия можно рассчитать согласно следующей формулы:

$$Y = w \cdot K \cdot \Pi, \text{ руб.} \quad (4)$$

где Y – ущерб нефтедобывающему предприятию от перерывов в электроснабжении, K – среднегодовой сброс нефти, Π – стоимость единицы продукции.

При расчете ущерба от перерывов в электроснабжении потребителей за определенный период необходимо подставлять не среднегодовые значения, а конкретные данные за рассчитываемый период.

Тогда согласно (4) появляется возможность произвести расчёт данной составляющей ущерба. Для этого необходимо перевести тонны в баррели нефти. В одной тонне российской нефти содержится 7,35 барреля. Стоимость нефти примем среднюю за текущий год 4909 руб. за один баррель. Тогда величина ущерба составит:

$$У = 25,7 \cdot 596,738 \cdot 7,35 \cdot 4909 = 553346528 \text{ руб.}$$

Суммарный ущерб от перерывов в электроснабжении системе распределительные сети – потребитель электрической энергии определяется как сумма двух ущербов. Тогда полный ущерб исследуемой системе нефтедобывающей компании и смежного электросетевого предприятия составит:

$$У_{\text{полн}} = 55346528 + 469983,38 = 553816511 \text{ руб.}$$

При сравнительно малом количестве перерывов в электроснабжении (25 в год) в нефтедобывающей отрасли ущерб составляет колоссальную величину в 553 млн. руб. Соответственно каждая авария в энергосистеме обходится очень дорого, следовательно, уровень надежности электроснабжения необходимо повышать и работать над каждым аварийным случаем.

Заключение

Разработанная методика расчета ущерба от перерывов в электроснабжении позволяет рассчитать ущерб не только в распределительных сетях, но и у потребителя в том случае, когда работа электросетевого предприятия направлена на работу единственного потребителя с множеством точек потребления. Достоинством данной методики является то, что опускается необходимость изучать детально всю схему электроснабжения, что существенно упрощает расчеты. Еще одним преимуществом является использование не среднестатистических данных по аналогичному оборудованию, а непосредственно информации именно исследуемой энергосистемы. Также в данной методике отражена специфика работы электросетевого предприятия, заключающаяся в учете не только времени восстановления элемента, но и продолжительности отключения потребителя. Расчеты последствий отказов электроснабжения нефтедобывающих месторождений продемонстрировали, что ущерб от перерывов электроснабжения нефтедобывающему предприятию на три порядка выше, чем внутри электросетевого предприятия и составил 553,8 и 0,47 млн. руб. соответственно. При такой взаимосвязанной работе потребителя и сетевой организации возникает необходимость повышать уровень надежности электроснабжения за счет технических и организационных мероприятий, предложенных в работе, а также подтверждается ответственность и значимость правильной работы сотрудников электроэнергетической отрасли.

Литература

1. Лесных В. В., Тимофеева Т. Б., Петров В. С. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении // Экономика региона. 2017. Т. 13, Вып. 3. С. 847-858.
2. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2016. 256 с
3. Эдельман В. И. Проблемы управления надежностью в электроэнергетике // Академия энергетики. 2008. №1. С.33-34.
4. Singh K. Electricity Network Reliability Optimization. Доступно по: <https://hobbydocbox.com/77076786-Radio/Electricity-network-reliability-optimization.html> Abdullah M. Al-Shaalan. reliability of power systems. Доступно по <https://www.intechopen.com/online-first/reliability-evaluation-of-power-systems>. 2019.
5. Li W., Sun L., Zou W., Luo C., et al. Power system reliability analysis system based on PSASP and fault enumeration method and applications // China International Conference on Electricity Distribution (CICED) : proc. Shenzhen, China, 23–26 September 2014. IEEE, 2014. doi: 10.1109/CICED.2014.6991921.
6. Bouziane B., Elmaouhab A., et al. Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar's Isolated Network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26-27 august 2019. – IEEE, 2019. doi: 10.1109/PGSRET.2019.8882711.
7. Ndawula, M.B.; Djokic, S.Z.; Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. Energies 2019, 12 (3), p. 531.
8. Меняйкин Д.А., Секретарев Ю.А. Применение нечеткой логики в теории надежности систем электроснабжения. В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ Сборник научных трудов в 9 частях. Новосибирский государственный технический университет. 2016. С. 24-26.

9. Эдельман В.И. Методика оценки ущерба потребителей энергии при нарушениях электроснабжения // Академия энергетики. 2009. №4.

10. Региональные электрические сети Основные виды деятельности. Доступно по <http://www.eseti.ru/about/prime.aspx>.

11. Секретарев Ю.А. Модель расчета ущерба от перерыва электроснабжения потребителей в распределительных сетях. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. №2. С.188-200

12. Шарыгин М.В. Разработка универсальной модели последствий отказов электроснабжения // Электричество. 2015. №3. С.4-11.

13. Чернев М.Ю. Анализ надежности схем электроснабжения на примере Астраханского газоперерабатывающего завода // Промышленная энергетика. 2017. № 8. С. 16-22.

14. Меняйкин Д.А., Секретарев Ю.А. Применение нечеткой логики в теории надежности систем электроснабжения. В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ Сборник научных трудов в 9 частях. Новосибирский государственный технический университет. 2016. С. 24-26.

15. Левин В.М. Управление ремонтами оборудования в системах электроснабжения нефтепромыслов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 6. С. 41-44.

Авторы публикации

Секретарев Юрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры Системы электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

Меняйкин Денис Анатольевич – аспирант Новосибирского государственного технического университета.

References

1. Lesnyh VV, Timofeeva TB, Petrov VS. Problemy ocenki ekonomicheskogo ushcherba, vyzvannogo pereryvami v elektrosnabzhenii. *Ekonomika regiona*. 2017;13(3):847-858. doi 10.17059/2017-3-17.

2. Viktorova VS, Stepanyanc AS. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*. M.: LENAND. 2016. P. 256 .

3. Edelman VI. Problems of reliability management in electric power industry. *Academy of energy*. 2008;1:33-34.

4. Singh K. Electricity Network Reliability Optimization. Доступно по: <https://hobbydocbox.com/77076786-Radio/Electricity-network-reliability-optimization.html>.

5. Li W, Sun L, Zou , Luo C, et al Power system reliability analysis system based on PSASP and fault enumeration method and applications. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED): proc. Shenzhen, China, 23-26 September 2014*. IEEE, 2014. doi: 10.1109/CICED.2014.6991921.

6. Bouziane B, Elmaouhab A, et al. Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar's Isolated Network of Algeria. *2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26-27 august 2019*. IEEE, 2019. doi: 10.1109 / PGSRET.2019.8882711.

7. Ndawula MB; Djokic SZ; Hernando-Gil I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. *Energies* 2019;12(3):531.

8. Menyаikin DA, Secretarev YA. Application of fuzzy logic in the theory of reliability of power supply systems. In the book: science. technologies. innovations *Collection of scientific papers in 9 parts. Novosibirsk state technical University*. 2016.pp. 24-26.

9. Edelman VI. Methods of assessing damage to energy consumers power failures. *Akademiya Energetiki*. 2009. N. 4.

10. Regional electric networks Main activities. Доступно по <http://www.eseti.ru/about/prime.aspx>.

11. Secretarev YA, Manyaikin DA. The Model of calculation of damage from the interruption of power supply in distribution networks. *Scientific transport problems of Siberia and the Far East*. 2018;2:188-200.

12. Sharygin M.V. Development of universal model of consequences of power supply failures.- 2015;3:4-11.

13. Chernev M.Yu. Analiz nadezhnosti skhem ehlektrosnabzheniya na primere Astrakhanskogo gazopererabatyvayushchego zavoda. *Promyshlennaya ehnergetika*. 2017;8:16-22.

14. Menyаikin D.A, Secretarev Y.A. Application of fuzzy logic in the theory of reliability of power supply systems. In the book: Science. Technologies. Innovations *Collection of scientific papers in 9*

parts. Novosibirsk state technical University. 2016. pp.24-26.

15. Levin V.M. Upravlenie remontami oborudovaniya v sistemakh ehlektrosnabzheniya neftepromyslov. *Ehlektrooborudovanie: ehkspluatatsiya i remont. 2019;6:41-44.*

Authors of the publication

Yuri A. Sekretarev – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Denis A. Menyaikin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
Email:Denmen1305@mail.ru.

Поступила в редакцию

14.01.2020г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА СТАТИЧЕСКУЮ АПЕРИОДИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.Г. Фишов, И.С. Мурашкина, А.И. Марченко, Э. Энхсайхан, И.С. Ивкин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

fishov@ngs.ru, murashkinainna@yandex.ru, andrey1991@ngs.ru

Резюме: Одним из основных направлений развития электроэнергетики во всем мире является использование распределения малой генерации, как на основе топливных углеродных ресурсов с синхронной связью между источниками при их подключении к электрическим сетям, так и возобновляемых источников энергии, работающих в электрической сети через частотно-преобразовательные устройства (электронной генерации). Последнее приводит к неизбежному массовому применению инверторов в существующих электрических сетях переменного тока. Задачами данного исследования является исследование влияния электронной генерации на режимы и устойчивость существующих электрических сетей и электроэнергетических систем, а также формирование требований к характеристикам к управлению электронной генерацией, которые позволяют минимизировать меры по согласованию релейной защиты и автоматики при интеграции электронной генерации в электрической сети, а также повысить надежность общего электрического режима. В статье представлены результаты исследования статической аperiodической устойчивости электроэнергетической системы при интеграции электронной генерации, требования к их статическим характеристикам и управлению при работе в составе электроэнергетической системы.

Ключевые слова: электронная генерация, возобновляемые источники энергии, устойчивость, электроэнергетическая система, управление.

Для цитирования: Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., Энхсайхан Э., Ивкин И.С. Исследование влияния электронной генерации на статическую аperiodическую устойчивость электроэнергетической системы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 51-64. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-51-64.

THE STUDY OF ELECTRONIC GENERATION EFFECT ON STATICAL APERIODIC STABILITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM

AG.Fishov, IS. Murashkina, AI. Marchenko, E. Erdenebat, YS. Ivkin¹

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
fishov@ngs.ru, murashkinainna@yandex.ru, andrey1991@ngs.ru

Abstract: One of the key aspects in the development of power engineering all over the world is the use of distributed small-scale generation. This is both based on fuel carbon resources with a synchronized connection between sources when they are connected to the electric power grids and renewable energy sources operated in the electrical grid via frequency converters (electronic generation). The latter brings an inevitable broad use of inverters in available AC power systems. The objectives of this paper are numerous. First is the desire to study the effect of electronic generation on modes and stability of current electrical grids and electrical power systems. Another objective is to establish requirements for electronic generation control that lets us minimize actions on relay protection coordination and automation upon the integration of electronic generation in power grids. A final objective is to increase the reliability of general electrical modes. This article shows the outcomes of the study on the statical aperiodic stability of the electrical power system upon the integration of electronic generation, requirements for its

statical characteristics, and the control when operated within the electrical power system.

Keywords: *electronic generation; renewable energy sources; stability; electrical power system; control.*

For citation: Fishov AG, Murashkina IS, Marchenko AI, Erdenebat E, Ivkin YS. The study of electronic generation effect on statical aperiodic stability of electrical power system // *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):51-64. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-51-64.

Введение

В настоящее время развитие электроэнергетики на основе концепции *Smart Grid* в России отличается от принятой в странах Европы, США и др., где такие объекты создаются преимущественно на базе возобновляемых источников энергии, работающих в составе электрической сети через частотно-преобразовательные устройства. В России, с ее климатическими и географическими особенностями, не менее активно развиваются топливные когенерационные генерирующие установки малой мощности. Их энергоблоки способны работать синхронно с общей распределительной электрической сетью энергосистемы, полноценно реализуя системные эффекты от совместного функционирования крупной концентрированной и малой распределенной генерации, используя системы автоматизированного интеллектуального управления [1, 2].

При подключении к энергосистеме и появлению в ней значительной доли в энергобалансе источников нетрадиционной энергетики или автономных систем электроснабжения *MiniGrid* стоит уделить отдельное внимание свойствам и анализу режимов работы энергосистемы с установками малой мощности, включающих в себя, как традиционную синхронную когенерацию, так и не синхронную генерацию, работающую от возобновляемых источников первичной энергии. Широкомасштабное развитие энергетики на возобновляемых источниках приводит к массовому применению инверторов (преобразователей постоянного тока в переменный) для создания автономных систем электроснабжения на переменном токе, а также включения источников постоянного тока через преобразователи (электронной генерации) в существующие сети переменного тока централизованных систем электроснабжения. Для большинства генераторов, использующих возобновляемые источники энергии, работа в сети переменного тока неизбежно связана с применением инверторов в виде преобразователей рода тока или частоты. Для таких источников электроэнергии введено новое понятие «Электронная генерация» [3-6].

Электронная генерация – источники электроэнергии, работающие в сети или питающие нагрузку через преобразовательные устройства. Одним из видов электронной генерации является виртуальная синхронная машина.

Положительный экологический эффект от использования возобновляемых источников энергии сопровождается множеством потенциально негативных технических последствий, обусловленных принципиальными особенностями инверторов при преобразовании постоянного тока в переменный, а также отсутствием обоснованных требований к характеристикам электронной малой генерации со стороны электрических сетей [7]. Последствия для электрических сетей от недостаточно проработанного включения в сети большого количества мощных инверторов заключается в снижении качества электроэнергии, надежности электроснабжения, связанном, как с отключениями инверторов, так и потребителей, нарушениями в работе средств релейной защиты и автоматики. При этом, основным побуждающим фактором включения инверторов в сети является повышение эффективности использования генерации на возобновляемых источниках энергии [8-10].

Инверторы в составе электронной генерации

В составе электронной генерации инверторы, как правило, выполняют следующие основные функции [11]:

- преобразование постоянного тока в переменный;
- синхронизация по частоте, напряжению и углу с энергосистемой;
- стабилизация выходного напряжения;
- ограничение токовых перегрузок при коротком замыкании.

У большинства применяемых в электрических сетях инверторов выходные параметры (форма, амплитуда, частота выходного напряжения) определяются схемой

преобразователя, системой управления и режимом его работы (не требуют внешних источников переменного напряжения, так как переменное напряжение нужной частоты создается самим инвертором). Различают три типа инверторов: инверторы тока; резонансные инверторы; инверторы напряжения. Система управления инверторов позволяет в режиме параллельной работы с сетью переменного тока поддерживать заданную активную и реактивную мощность, либо активный и реактивный ток (P , Q , $I_{\text{акт}}$, $I_{\text{реакт}}$).

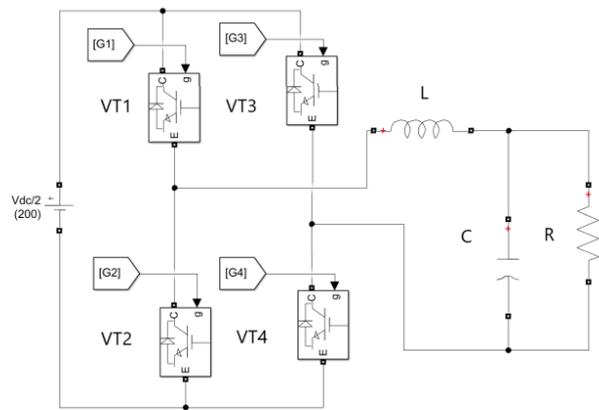
Наиболее широкие возможности и области применения у инвертора напряжения. Помимо преобразования постоянного тока в переменный он может в обратном режиме выполнять преобразование переменного напряжения в постоянное.

Большое распространение получила мостовая схема инвертора напряжения, приведенная на рис. 1. Благодаря специальному принципу управления транзисторами (многократная широтно-импульсная коммутация) форма переменного напряжения получается приближенной к синусоидальной.

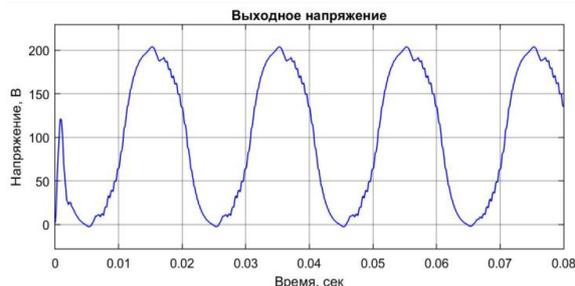
Сигналы управления (импульсы) $G1 \dots G4$ поступают таким образом, что в каждом полупериоде два транзистора включены, а два других выключены. Длительность подачи импульсов варьируется по синусоидальному закону. Высокочастотный фильтр нижних частот придает напряжению точную синусоидальную форму.

Управление подобными силовыми преобразователями осуществляется с помощью регулирования времени открытого состояния транзисторов по отношению к периоду его работы. Такое регулирование реализуется посредством широтно-импульсной модуляции.

Регулирование выходного напряжения и фазы напряжения можно осуществлять с помощью фазового регулирования или с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [12,13].



а)



б)

Рис. 1. а) Схема однофазного инвертора при наличии фильтра высших гармоник;
б) Осциллограмма выходного напряжения, полученная при моделировании в *MathLab Simulink*

Инверторы напряжения работают либо в режиме *Master* (источника напряжения), либо в режиме *Slave* (источника тока).

В режиме *Master* системой управления инвертора регулируется частота и напряжение в зависимости от мощности в точке присоединения инвертора к электрической сети. В этом режиме, возможно, осуществлять поддержание заданного напряжения, регулировку напряжения и частоты со статизмом (рис. 2 а).

В режиме *Slave* системой управления инвертора выходной ток регулируется в зависимости от напряжения в точке присоединения инвертора к электрической сети. В этом режиме, возможно, осуществлять стабилизацию выдаваемого тока и регулировку выдаваемой мощности (рис. 2 б).

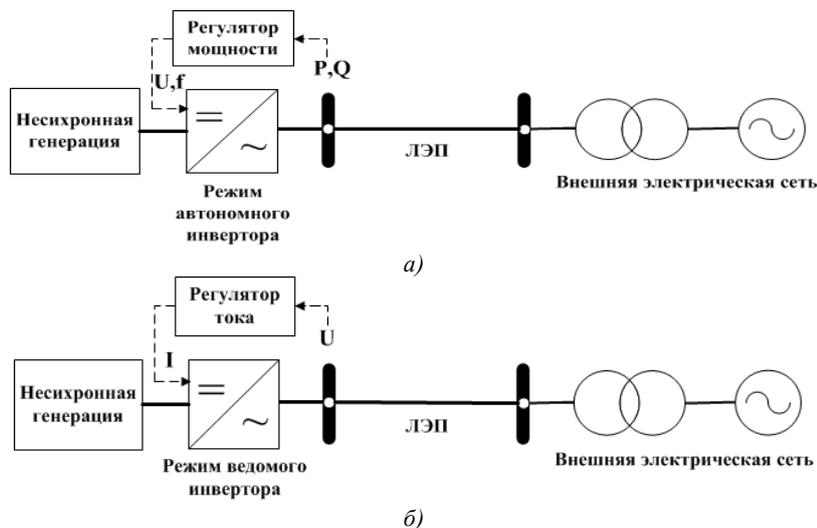


Рис. 2. Схема включения ЭГ в режиме: а) *Master* (источника напряжения); б) *Slave* (источника тока)

Если электрическая сеть *MiniGrid* является сетью переменного тока и подключена к внешней электрической сети, то все инверторы работают в режиме *Slave*. В этом режиме инверторы отслеживают напряжение в точке присоединения и выдают ток согласно с этим напряжением. При исчезновении напряжения инверторы отключаются. В автономном режиме один из инверторов должен быть переведен в режим *Master*, причем большое значение при этом имеют внутренние балансы активной и реактивной мощности [14,15].

Устойчивость режимов электроэнергетических систем

Устойчивость режима электроэнергетической системы (ЭЭС) является основой надежности энергосистем и электроснабжения потребителей. Она определяет устойчивоспособность ЭЭС, которая характеризует способность ЭЭС противостоять возмущениям без нарушения электроснабжения потребителей.

При исследовании устойчивости режимов ЭЭС принято использовать следующую классификацию видов устойчивости, исходя из характера процессов при ее нарушении и воздействий, вызывающих эти нарушения [16-17]:

- статическая устойчивость режима ЭЭС – способность системы сохранять текущее состояние или близкое к нему при малых возмущениях;
- статическая аperiodическая устойчивость режима ЭЭС – способность системы не допускать аperiodического увеличения отклонений её параметров от исходного состояния при малых возмущениях;
- статическая колебательная устойчивость режима ЭЭС - способность системы не допускать увеличения отклонений её параметров от исходного состояния в колебательном процессе при малых возмущениях;
- динамическая устойчивость режима ЭЭС – способность системы сохранять текущее состояние или близкое к нему при больших возмущениях;
- результирующая устойчивость режима ЭЭС – способность системы сохранять текущее состояние или близкое к нему при больших возмущениях, допуская нарушения устойчивости в переходном процессе.

Для систем с высокой долей распределенных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), имеющих негарантированную выработку электроэнергии и мощности, а также энергетические ячейки (*Mini* и *Microgrid*) в своем составе, целесообразно ввести дополнительное понятие устойчивости режима ЭЭС:

Системно устойчивый режим ЭЭС, имеющей в своем составе энергетические ячейки и источники негарантированной выработки электроэнергии – режим ЭЭС, в котором при малых или больших возмущениях, а также при нарушениях общего баланса устойчивости режима сохраняется в системе в целом, но при этом могут возникать нарушения устойчивости или их выделения из общей сети в тех ячейках, в которых

возникли возмущения, без их распространения на другие части ЭЭС.

Режимы и характеристики электронной генерации, влияющие на статическую аperiodическую устойчивость ЭЭС

Пределы статической аperiodической устойчивости ЭЭС существенно зависят от статических характеристик нагрузок и генерации, в т.ч. электронной.

Рассмотрим базовые режимы и первичные характеристики инверторов электронной генерации (ЭГ).

Режим А1

Инвертор электронной генерации работает в режиме «Slave» (источника тока) совместно с электронной генерацией, работающей в режиме «Master» (источника напряжения), или с синхронной генерацией, либо синхронно с активной электрической сетью. Система управления поддерживает постоянство выдаваемого тока.

Статические характеристики для режима А1 определяются следующим образом:

$$\begin{cases} I = \text{const}, \text{ если } |I| \leq I_{\text{доп.}} \text{ и } |U| < U_{\text{макс.}} \\ I = 0, \text{ если } |U| \geq U_{\text{макс.}} \end{cases}$$

На рис. 3 и 4 показаны зависимости токов от напряжения в точке подключения электронной генерации и соответствующие зависимости мощностей от напряжения, где $U_{\text{п.схр.}}$ – напряжение, ниже которого инвертор может потерять синхронизацию.

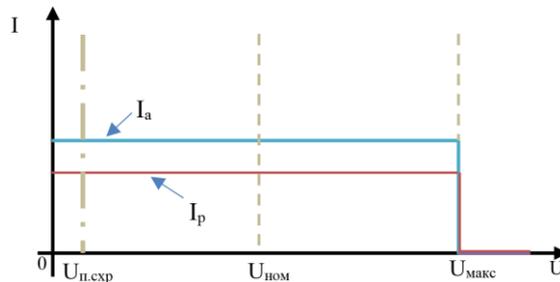


Рис. 3. Зависимости тока от напряжения при $I = \text{const}$ в режиме А1

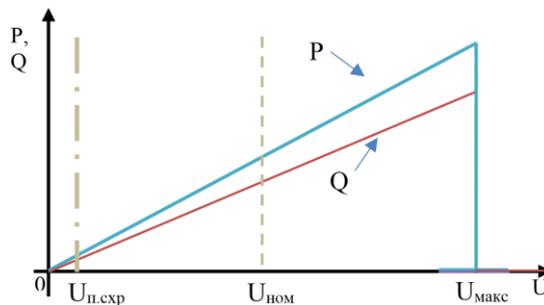


Рис. 4. Зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения при $I = \text{const}$ в режиме А1

Режим А2

Инвертор электронной генерации работает совместно с синхронной генерацией или синхронно с активной электрической сетью аналогично режиму А1, однако, в данном режиме система управления поддерживает постоянство выдаваемых активной и реактивной мощностей.

Статические характеристики в режиме А2 определяются следующим образом:

$$\begin{cases} |S| = \text{const}, \text{ если } |I| \leq I_{\text{доп.}} \text{ и } |U| < U_{\text{макс.}} \\ \underline{S} = I_{\text{доп.}} * U, \text{ если } |I| \geq I_{\text{доп.}} \text{ и } |U| < U_{\text{макс.}} \\ \underline{S} = 0, \text{ если } |U| \geq U_{\text{макс.}} \end{cases}$$

На рис. 5 приведены зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения при изменениях поведения инвертора в критических точках ($U_{\text{мин}} = S/I_{\text{доп.}}$, $|U| = U_{\text{макс.}}$).

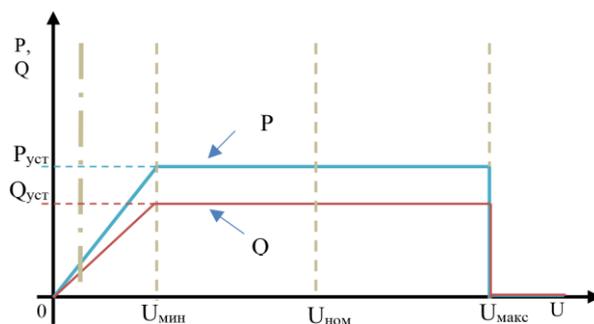


Рис. 5. Зависимости активной и реактивной мощностей от напряжения при $|S| = \text{const}$ в режиме $A2$

Режим В

В режиме В инвертор электронной генерации работает в ведущем режиме «Master», при этом возможна параллельная работа с другой(ими) электронной генерацией, но при условии ее работы в режиме A1 или A2 (ведомый режим «Slave»). Система управления автоматически поддерживает постоянные модуль, фазу и частоту выдаваемого напряжения.

Статические характеристики в режиме В определяются следующим образом:

$$\begin{cases} |U| = \text{const}, (U, \delta, f) = \text{const}, \text{ если } U < U_{\text{макс.}} \\ \underline{U} = 0, \text{ если } U \geq U_{\text{макс.}} \\ \underline{U} = 0, \text{ если } |I| \geq I_{\text{доп.}} \end{cases}$$

На рисунке 6 показана зависимость напряжения от тока инвертора.

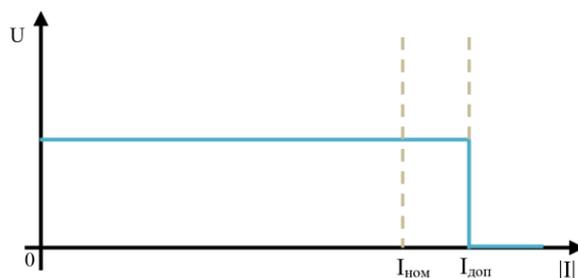


Рис. 6. Зависимость напряжения от тока инвертора в режим В

Статические характеристики инвертора как виртуального генератора

Под виртуальным генератором понимается источник электроэнергии, включенный в электрическую сеть переменного тока через инвертор, имитирующий динамические характеристики, а также, статизм по напряжению и частоте электрического генератора традиционного источника [14,15].

Инвертор в качестве виртуального генератора использует режим A2, причем, установка по активной мощности изменяется в зависимости от частоты, а по реактивной мощности в зависимости от напряжения.

Статическая характеристика для активной мощности определяется как $P_{уст} = P_0 - k \times \Delta f$ со следующими ограничениями:

$$\begin{cases} P_{уст} = P_{\text{макс}}, \text{ если } P_{уст} > P_{\text{макс.}} \\ P_{уст} = P_{\text{мин}}, \text{ если } P_{уст} < P_{\text{мин.}} \\ P = 0, \text{ если } f > f_{\text{макс.}} \text{ или } f < f_{\text{мин.}} \text{ (имитация отключения генератора} \end{cases}$$

от сети)

На рис. 7 показана зависимость активной мощности от частоты тока.

Статическая характеристика для реактивной мощности определяется как $Q_{уст} = Q_0 - k \times \Delta U$, со следующими ограничениями:

$$\begin{cases} Q_{уст} = Q_{\text{макс}}, \text{ если } Q_{уст} > Q_{\text{макс.}} \\ Q_{уст} = Q_{\text{мин}}, \text{ если } Q_{уст} < Q_{\text{мин.}} \\ Q = 0, \text{ если } U > U_{\text{макс.}} \\ Q = I_{\text{доп.}} \cdot U, \text{ если } |I| \geq I_{\text{доп.}} \end{cases}$$

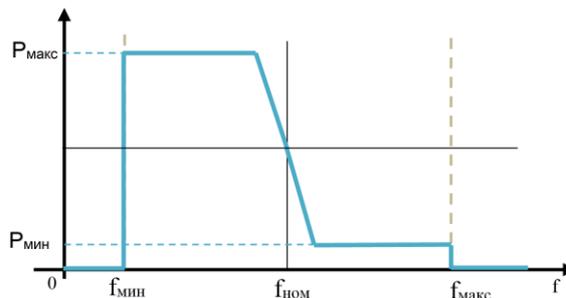


Рис. 7. Характеристика активной мощности регулируемой ЭГ

На рис. 8 показано изменение реактивной мощности в зависимости от напряжения.

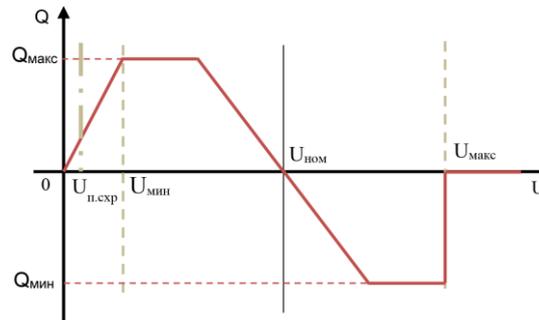


Рис. 8. Характеристика реактивной мощности по напряжению регулируемой электронной генерации (режим Виртуального генератора)

Недостатком представленных статических характеристик является их кусочная дифференцируемость, так как в критических точках производные величин равны бесконечности, что затрудняет расчет электроэнергетического режима и контроль его устойчивости.

Влияние электронной генерации на статическую устойчивость в схеме электропередачи с ее промежуточным подключением

Для оценки влияния электронной генерации на пределы по статической аперiodической устойчивости ЭЭС изначально обратимся к простейшей схеме электропередачи 35 кВ, изображенной на рис. 9.

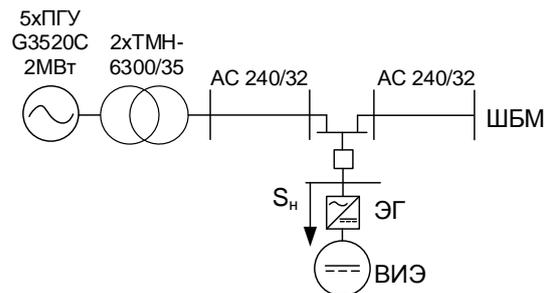


Рис. 9. Схема электропередачи с подключением электронной генерации в промежуточном узле нагрузки

Определим угловые характеристики синхронной генерации (СГ) в схеме при включенном и отключенном выключателе в узле нагрузки (нагрузка и электронная генерация одинаковой мощности). Нагрузку представим типовой статической характеристикой, а ЭГ будет работать либо в режиме поддержания постоянного тока, либо в режиме поддержания постоянной генерируемой мощности. Схемы замещения при включенной и отключенной нагрузке, а также ЭГ, показаны на рис. 10.

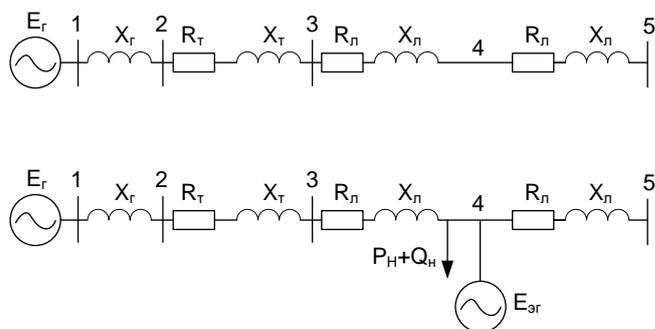


Рис. 10. Схемы замещения для определения угловых характеристик и пределов передаваемой мощности по статической аperiodической устойчивости

Параметры генераторов, трансформаторов и линий схемы замещения, а также типовые статические характеристики нагрузки приведены в табл.1-4.

Таблица 1

Параметры генераторов

| Генератор | n | $P_{ном.}$ МВт | $\cos\varphi$ | $U_{б.}$ кВ | T_j, c | $X_{d.}$ Ом | $X'_{d.}$ Ом | $X''_{d.}$ Ом | $X_q,$ Ом | $T_{d0},$ с |
|-----------|-----|-------------------|---------------|----------------|----------|----------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|
| G3520C | 5 | 1,98 | 0,8 | 10,5 | 3 | 23,2 | 2,21 | 1,83 | 12,65 | 4,92 |

Таблица 2

Параметры трансформаторов

| Трансформатор | n | $S_{ном}$ | $U_{вн}$ | $U_{нн}$ | $P_{кз\text{ вн-нн}}$ | $P_{хх}$ | $U_{кз}, \%$ |
|---------------|-----|-----------|----------|----------|-----------------------|----------|--------------|
| | | | | | | | вн-нн |
| | | МВА | кВ | кВ | кВт | кВт | % |
| ТМН-6300/35 | 2 | 6,3 | 35 | 11 | 46,5 | 9,25 | 7,5 |

Таблица 3

Параметры линий

| Линия | Тип провода | n | Длина | r_0 | x_0 | R | X |
|-----------|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | км | Ом/км | Ом/км | Ом | Ом |
| Линия 1,2 | АС 240/32 | 1 | 100 | 0,118 | 0,406 | 1,062 | 3,654 |

Таблица 4

Параметры характеристик нагрузки

| № | Вид характеристик | a_0 | a_1 | a_2 |
|---|--|-------|-------|-------|
| 1 | Типовая характеристика активной мощности | 0,83 | -0,3 | 0,47 |
| | | b_0 | b_1 | b_2 |
| 2 | Типовая характеристика реактивной мощности на стороне 6 – 10 кВ | 4,9 | -10,1 | 6,2 |
| 3 | Типовая характеристика активной мощности на стороне 110 – 220 кВ | 3,7 | -7 | 4,3 |

Для определения угловых характеристик и предела по статической устойчивости СГ производилось утяжеление режима в Программно-вычислительном комплексе «Mustang» путем увеличения загрузки СГ при работе с ЭГ разной мощности, а также путем увеличения нагрузки схемы.

Характерных зависимости представлены на рис. 11, 12, 13.

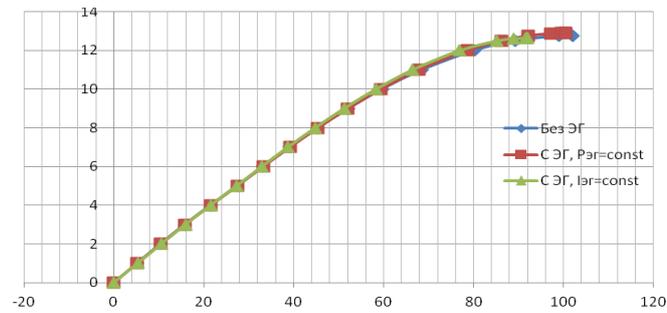


Рис. 11. Угловые характеристики СГ совместно и без ЭГ мощностью 10 МВт

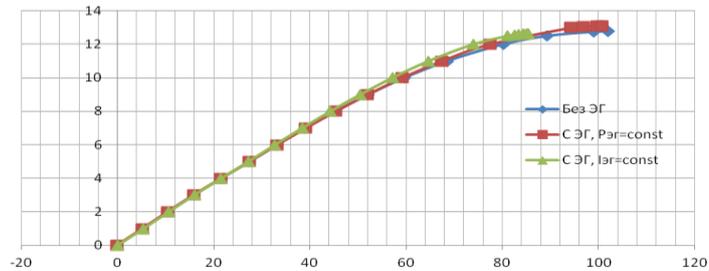


Рис. 12. Угловые характеристики СГ совместно и без ЭГ мощностью 20 МВт

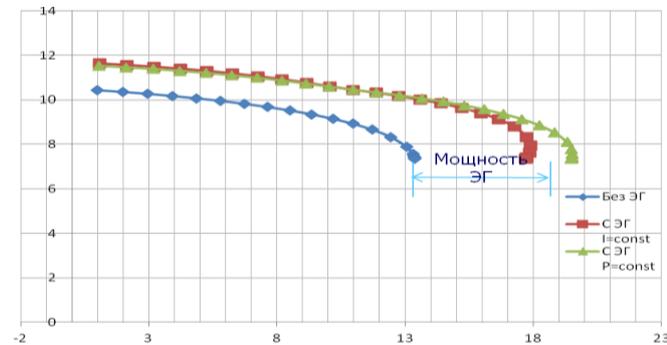


Рис. 13. Зависимость напряжения в точке подключения нагрузки от величины нагрузки

На рис. 11, можно увидеть влияние режимов ЭГ на угловые характеристики мощности и пределы по статической устойчивости режима параллельной работы генераторов и приемной системы.

На рис. 13 можно увидеть влияние режимов ЭГ предельную нагрузку сети в промежуточной точке по условию критического снижения напряжения.

Как следует из представленных графиков, ЭГ в целом оказывает положительное влияние на статическую устойчивость ЭЭС. При этом для повышения устойчивости параллельной работы генераторов в ЭЭС предпочтительны режимы ЭГ с поддержанием постоянства выдаваемой мощности, а для предотвращения критических снижений напряжения – постоянства выдаваемых токов.

Исследование влияния электронной генерации на устойчивость сложной электроэнергетической системы (*MacroGrid*)

Исследование влияния электронной генерации на статическую аperiodическую устойчивость проводилось на примере электроэнергетической системы Монголии. Варьировались, как сами статические характеристиками, так и места размещения электронной генерации в схеме энергосистемы. В качестве показателей использовались предельные по статической устойчивости перетоки в основных сечениях электрической, получаемые путем утяжеления режима по траектории, соответствующей наименьшей предельной передаваемой мощности.

Для ЭЭС Монголии существует системная задача по размещению возобновляемых источников энергии (ВИЭ), исходя из системных свойств энергосистемы, и, если рассматривать размещение электронной генерации как системную задачу, то возникает вопрос о том, в каких районах сети предпочтительно размещение ВИЭ.

В качестве расчетной схемы для определения влияния ЭГ на пределы передаваемой мощности по основным сечениям электрической сети была использована схема энергосистемы Монголии (рис.14).

Расчетная схема Монгольской ЭЭС содержит основную сеть напряжением

(35 – 220) кВ, межсистемную связь (Россия-Монголия) 220 кВ, кольцевые сети 110 кВ крупных городов Монголии, распределительную сеть 35 кВ. Красным цветом обозначены линии и шины номинальным напряжением 220 кВ, синим – 110 кВ, зеленым – 35 кВ. Электрические нагрузки определены на основе балансов мощности и электроэнергии Монгольской энергосистемы с учетом прогноза максимумов нагрузки. Загрузка электростанций соответствует режиму максимума нагрузки.

Ниже представлены результаты для двух сечений сети.

Сечение №1 является главной связью ЭЭС Монголии с Единой энергетической системы России (ЕЭС России) (Рис. 15). Его особенностью является поддержание баланса мощности ЭЭС Монголии за счет обмена мощностью с ЕЭС России. Средний переток мощности составляет около 110 МВт.

Расчеты потокораспределения выполнялись с использованием программного комплекса «АНАРЭС», предназначенного для решения задач по планированию и анализу режимов электрических сетей и систем.

Определение предельного по статической аperiodической устойчивости перетока для сечения №1

Утяжеление производилось увеличением нагрузки в районе 3. Первоначальная нагрузка в утяжеляемом узле составляет 185+j82 МВА. Мощность нерегулярных колебаний 25 МВт. Предельные перетоки в результате утяжеления для сечения 1 при двух включенных в сечении цепях линии представлены в табл. 5.

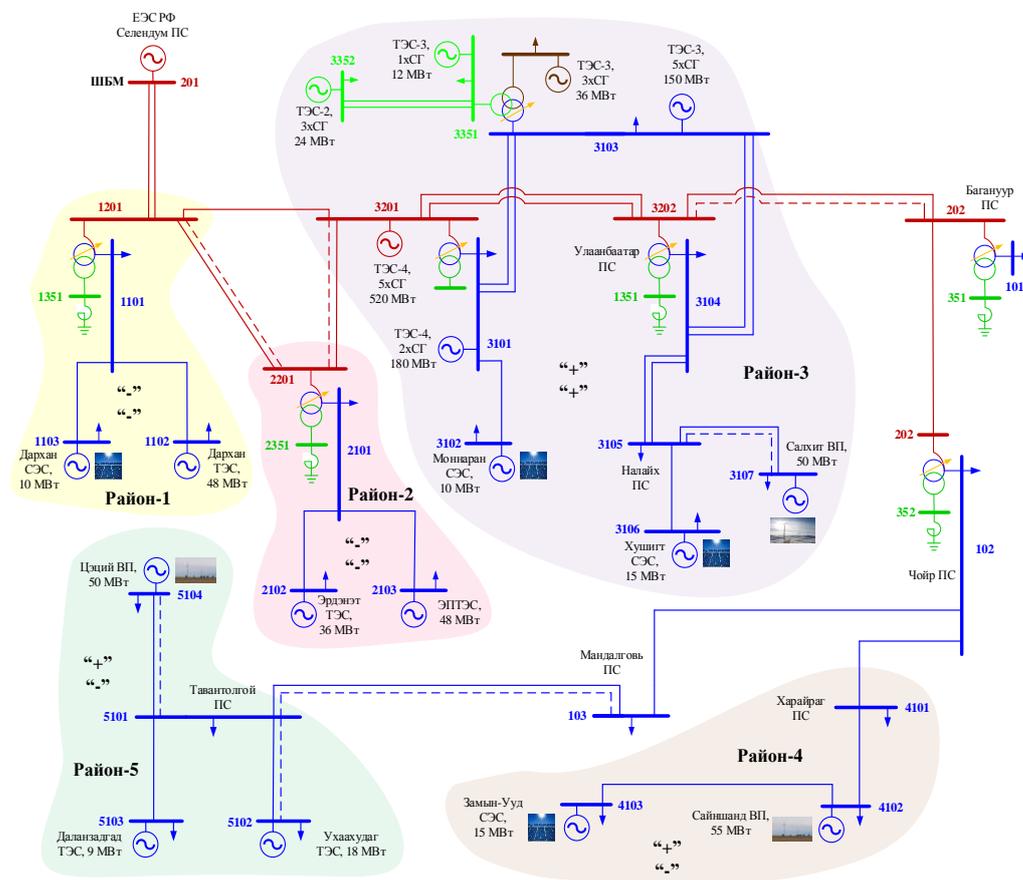


Рис. 14. Расчетная схема эквивалента Монгольской электроэнергетической системы

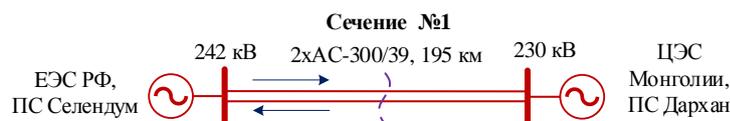


Рис. 15. Сечение по связям с РФ

Сечение №2 (Рис. 16) относится к дефицитной по активной и реактивной мощности и электроэнергии части энергосистемы (Район 2), поэтому в этом сечении переток мощности, в основном, направлен в сторону подстанции ПС Эрдэнэт.

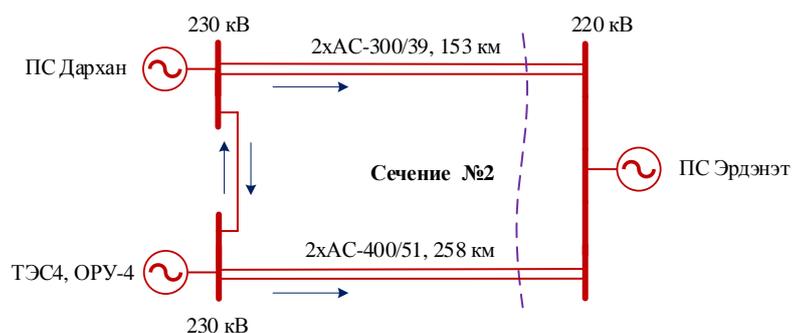


Рис. 16. Сечение по связям с районом 2

Таблица 5

Результаты расчета предельных режимов для сечения 1

| № | Рассматриваемые варианты | Причина расходимости решения УУР | Увеличение суммарной нагрузки в утяжеленном районе, МВА | Загрузка сечения в исходном нормальном режиме, МВА | Предел передаваемой мощности, МВт |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| 1 | Без учета ВИЭ | По предельной мощности | $259+j116$ | $190-j24$ | 527 |
| 2 | С учетом существующего размещения ВИЭ | По снижению напряжения | $376+j169$ | $55-j12$ | 514 |
| 3 | Изменение расположения ВИЭ | По снижению напряжения | $380+j171$ | $63-j13$ | 540 |

Определение предельного по статической аperiodической устойчивости перетока для сечения №2

Утяжеление производилось увеличением нагрузки в районе 2. Первоначальная нагрузка в утяжеляемом узле составляет $165+j55$ МВА. Предельные перетоки в результате утяжеления для сечения 2 представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета предельных режимов для сечения 2

| № | Рассматриваемые варианты | Причина расходимости решения УУР | Увеличение суммарной нагрузки в утяжеляемом районе, МВА | Загрузка сечения в исходном нормальном режиме, МВА | Предел передаваемой мощности, МВт |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| 1 | Без учета ВИЭ | По снижению напряжения | $282+j127$ | $146-j38$ | 459 |
| 2 | С учетом существующего размещения ВИЭ | По снижению напряжения | $282+j127$ | $146-j42$ | 460 |
| 3 | Изменение расположения ВИЭ | По снижению напряжения | $443+j199$ | $22-j41$ | 498 |

При расчете предельных режимов и моделировании ВИЭ, расположенных распределено по всей энергосистеме Монголии, предел передаваемой мощности существенно не изменился. При размещении ВИЭ концентрированно в утяжеляемом районе предельный переток мощности увеличился по первому расчетному сечению на 2,5%, а по второму на 8%.

Из этого следует, что целенаправленное размещение электронной генерации в

энергосистеме положительно влияет на сетевые ограничения, а пределы по устойчивости зависят не только от статических характеристик, но и от расположения подключенной электронной генерации.

Заключение

В проведенных исследованиях выполнен анализ влияния размещения, режимов и характеристик электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы на примере, как простых, так и сложных энергосистем. В существующей практике при расчете режимов энергосистем статические характеристики электронной генерации задаются разработчиками оборудования, при этом не учитываются условия их работы в энергосистеме, в том числе влияние на устойчивость режима. Определены условия совместимости характеристик электронной генерацией с внешней энергосистемой. В статье показано, что положительное влияние на устойчивость параллельной работы синхронных частей электроэнергетической системы оказывают режимы электронной генерации с поддержанием заданной мощности, в том числе с требуемым статизмом. Режимы электронной генерации с поддержанием постоянства тока полезны в районах, опасных по недопустимому по условию устойчивости режима энергосистемы снижению напряжения. Концентрированное размещение электронной генерации в дефицитных районах энергосистемы повышает устойчивость режимов и пропускную способность электрической сети, однако, если эта генерация имеет стохастический характер, то снижается балансовая устойчивость режима электроэнергетической системы.

Литература

1. Фишов А.Г., Ландман А.К., Сердюков О.В. SMART технологии для подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // Материалы 8 Международной молодежной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи - 2017»; 02-06 октября 2017 г., Самара. С. 27-34.
2. Марченко А.И., Фишов А.Г., Дронова Ю.В. Моделирование и анализ системных эффектов от присоединения малой генерации к электрическим сетям // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы 21 Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2-4 дек. 2015, Т.1, г.Томск : Скан, 2015. С. 176-179.
3. Caballero V., Vernet D., Zaballos A., et al. Prototyping a web-of-energy architecture for smart integration of sensor networks in smart grids domain // Sensors (Switzerland). 2018.V.18, N.5. doi: 10.3390/s18020400
4. Ghasempour A. Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges // Inventions. 2019. V.4, N1. doi: 10.3390/inventions4010022
5. Cao Y. A comprehensive review of Energy Internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2018. V.6, N3. pp. 399-411. doi: 10.1007/s40565-017-0350-8
6. Saleem Y., Crespi N., Rehmani M. H., et al. Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions // IEEE Access. 2019. V.7. pp. 62962–63003. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984
7. Марченко А.И., Денисов В.В., Мурашкина И.С. Средства и способы управления параллельной работой электрической станций малой генерации с электрической сетью // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. №1(74). С. 77–90. doi: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.
8. Zhou Y., Ni W., Zhu Z. Architecture of Energy Internet and Its Technologies in Application Reviewed // J. Clean Energy Technol. 2017. V.5, N4. pp. 320–327. doi: 10.18178/jocet.2017.5.4.391
9. Wu F.F., Varaiya P.P., Hui R.S. Smart Grids with Intelligent Periphery: An Architecture for the Energy Internet // Engineering. 2015.V.1, N4. pp. 436–446. doi: 10.15302/J-ENG-2015111
10. Mao D., Cao X., Han X., et al. Routing Architecture of Software Defined Energy Internet // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2018. V.192, N1. doi: 10.1088/1755-1315/192/1/012067
11. Исмаилов Ф.Р., Шарифов Б.Н., Гайзинз Б.М., и др. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. № 4 (74). С. 71-79.
12. Zharkov M.A., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., et al. Experiment results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source // Proceedings of the 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016; 30 June – 4 July 2016; Altai, Erlagol, Novosibirsk:NSTU; 2016. pp. 623-627 doi: 10.1109/EDM.2016.7538810.
13. Miveh M.R., Rahmat M.F., Ghadimi A. Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. pp. 1592-610.

14. Цифровая энергетика: видение, практики, технологии : Информационно-аналитические работы 2018 г. Инфраструктурный Центр EnergyNet. 2018. 224 с.

15. D'Arco S., Suul J.A., Fossob O.B. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids // Electric Power Systems Research, May 2015. V.122. pp. 180-197. doi: doi.org/10.1016/j.epsr.2015.01.001

16. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М: Энергия, 1979. 456 с.

17. Armeev D.V., Chuvashv R. Stability operation of grid connected inverter // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 114: Energy Systems Research 2019 : intern. conf. of young scientists. Art. 04003 (4 p.). doi: 10.1051/e3sconf/201911404003 .

Авторы публикации

Фишов Александр Георгиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

Мурашкина Инна Сергеевна – аспирант, Новосибирский государственный технический университет.

Марченко Андрей Иванович – заведующий сектором диссертационных советов Отдела подготовки кадров высшей квалификации, Новосибирский государственный технический университет.

Энхсайхан Эрдэнэбат – аспирант, Новосибирский государственный технический университет.

Ивкин Ефим Сергеевич – аспирант, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Fishov AG, Landman AK, Serdyukov OV. SMART tekhnologii dlya podklyucheniya k elektricheskim setyam i upravleniya rezhimami maloi generatsii. *Materialy 8 Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnikeskoj konferentsii «Energetika glazami molodezhi 2017»*; 02–06 oktyabrya 2017, Samara Russia. 2017 pp. 27–34.

2. Marchenko AI, Fishov AG, Dronova YuV. Modelirovanie i analiz sistemnykh effektiv ot prisoedineniya maloi generatsii k elektricheskim setyam. *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost' : materialy 21 Vserossiiskoi. nauchno-tekhnikeskoj konferentsii, 2-4 dek. 2015, Tomsk, Russia, 2015.* pp. 176-179.

3. Caballero V, Vernet D, Zaballos A, et al. Prototyping a web-of-energy architecture for smart integration of sensor networks in smart grids domain. *Sensors (Switzerland)*. 2018;18(5). doi: 10.3390/s18020400.

4. Ghasempour A. Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges. *Inventions*. 2019; 4(1). doi: 10.3390/inventions4010022.

5. Cao Y. A comprehensive review of Energy Internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2018;6(3):399-411. doi: 10.1007/s40565-017-0350-8.

6. Saleem Y, Crespi N, Rehmani MH, et al. Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions. *IEEE Access*. 2019;7:62962–63003. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984

7. Marchenko AI, Denisov VV, Murashkina IS. Sredstva i sposoby upravleniya parallel'noi rabotoi elektricheskoi stantsii maloi generatsii s elektricheskoi set'yu. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;1(74):77-90. doi: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.

8. Zhou Y, Ni W, Zhu Z. Architecture of Energy Internet and Its Technologies in Application Reviewed. *J. Clean Energy Technol*. 2017;5(4):320-327. doi: 10.18178/jocet.2017.5.4.391

9. Wu FF, Varaiya PP, Hui RS. Smart Grids with Intelligent Periphery: An Architecture for the Energy Internet. *Engineering*. 2015;1(4): 436-446. doi: 10.15302/J-ENG-2015111

10. Mao D, Cao X, Han X, et al. Routing Architecture of Software Defined Energy Internet. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*. 2018; 192(1). doi: 10.1088/1755-1315/192/1/012067

11. Ismailov FR, SHarifov BN, Gayzinz BM, et al. Issledovanie parallel'noy raboty solnechnoy elektrostantsii s set'yu. *Vestnik UGATU*. 2016;20:4 (74):71-79.

12. Zharkov MA, Bachurin PA, Kharitonov SA., et al. Experiment results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source. *The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016; 30 June – 4 July 2016; Altai, Erlagol,*

Novosibirsk:NSTU; 2016. pp. 623-627 doi: 10.1109/EDM.2016.7538810.

13. Miveh MR, Rahmat MF, Ghadimi A. Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; pp. 1592-1610.

14. *Tsifrovaya energetika: videnie, praktiki, tekhnologii : Informatsionno-analiticheskie raboty* 2018 g. Infrastrukturnyi Tsentr EnergyNet. 2018.

15. D'Arco S, Suul JA, Fossob OB. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids. *Electric Power Systems Research*, May 2015;122:180-197. doi.org/10.1016/j.epsr.2015.01.001

16. Zhdanov PS. Voprosy ustoichivosti elektricheskikh sistem. M: Energiya, 1979.

17. Armeev DV, Chuvashv R. Stability operation of grid connected inverter. *E3S Web of Conferences*. 2019; 114: Energy Systems Research 2019: Art. 04003 (4 p.). doi: 10.1051/e3sconf/201911404003 .

Authors of the publication

Alexander G. Fishov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia Email: fishov@ngs.ru.

Inna S. Murashkina – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: murashkinainna@yandex.ru.

Andrey I. Marchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia Email: andrey1991@ngs.ru.

Enkhsayhan Erdenebat – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Efim S. Ivkin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила в редакцию

04.02.2020г.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Е.И. Грачева¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный университет, г. Курск, Россия

Резюме: В статье исследуются основные особенности компоновки электрооборудования цеховых сетей внутризаводского электроснабжения с определением показателей группы цеховых потребителей, присоединенных к одному центру питания, влияющие на выбор структуры схем участков цеховых сетей. Выявлены параметры, характеризующие топологию схем. Представлено исследование влияния коэффициента загрузки цеховых трансформаторов на их коэффициент реактивной мощности, доказана расчетным путем по технико-экономическим критериям целесообразность замены цехового трансформатора на два с меньшей суммарной мощностью. Проведен расчет экономии электроэнергии во внутризаводских системах электроснабжения. Установлен вид зависимостей $\text{tg}\varphi$ трансформаторов ТМ и ТСЗ с различными номинальными мощностями в функции загрузки трансформаторов. Представлены наиболее значительные факторы роста потерь мощности холостого хода в процессе эксплуатации. С определением потерь активной и реактивной мощности и электроэнергии в трансформаторах и потерь активной мощности в распределительной сети высокого напряжения.

Проведено технико-экономическое сопоставление вариантов схем внутризаводского электроснабжения при установленных двух трансформаторах меньшей мощности вместо одного и расчетным путем доказана целесообразность такой замены для повышения эффективности функционирования оборудования и определен расчетный срок окупаемости капитала вложений. Проведен сравнительный анализ исследуемых схем электроснабжения промышленных предприятий с выделением их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: трансформатор, экономия электроэнергии, коэффициент загрузки, эффективность эксплуатации, раздельное питание, технико-экономические параметры.

Для цитирования: Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74.

CALCULATION OF THE ECONOMY OF ELECTRIC ENERGY IN INDUSTRIAL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

E.I. Gracheva¹, A.N. Gorlov², Z.M. Shakurova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

Abstract: The article examines the main features of the layout of electrical equipment for shop networks of internal power supply with the definition of indicators for a group of shop customers connected to a single power center, affecting the choice of the structure of schemes for shop network sites. The parameters characterizing the circuit topology are revealed. A study is presented of the influence of the load factor of workshop transformers on their reactive power factor, it is proved by calculation by technical and economic criteria the feasibility of replacing a workshop transformer with two with a lower total power. The calculation of energy savings in the in-plant power supply systems. The type of dependences $\text{tg}\varphi$ of transformers TM and TC3 with various rated powers in the function of loading transformers is established. The most significant factors of the growth of idle power losses during operation are presented. With determination of losses of active and reactive power and electricity in transformers and losses of active power in a high voltage distribution

network

A feasibility study was carried out on the options for internal power supply schemes with two transformers of lower power installed instead of one, and the feasibility of such a replacement to increase the efficiency of the equipment was proved and the estimated payback period for the investment capital was determined. A comparative analysis of the studied power supply schemes of industrial enterprises with the identification of their advantages and disadvantages.

Key words: transformer, energy saving, load factor, operating efficiency, separate power, technical and economic parameters.

For citation: Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):65-74. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74.

Введение

В современных условиях развития объектов электроэнергетики и промышленности наблюдается тенденция построения оптимальной топологии электрических сетей и систем электроснабжения всех уровней, а также внедрения систем «умных сетей» или «интеллектуальных сетей» [1-4].

Во внутризаводском электроснабжении низковольтные электрические сети имеют наиболее сложную структуру и протяженную длину. Низковольтные системы внутрицехового электроснабжения предназначены для распределения электрической энергии внутри производственных подразделений и электропитания потребителей напряжением до 1 кВ [5-7].

Как известно, системы внутризаводского и внутрицехового электроснабжения должны обеспечивать потребителей электроэнергией в соответствии с ГОСТ на качество электроэнергии при соблюдении надежности электроснабжения согласно с категории потребителей [8-10].

В производственных цехах предприятий металлообработки, черной и цветной металлургии, электронной промышленности преобладают потребители электроэнергии первой и второй категории. Производственные цеха и участки электротехнической и электронной промышленности предприятий являются, как правило, двухменными. Потребители данных предприятий относятся ко второй и частично к первой и третьей категориям.

В системах внутрицехового электроснабжения применяются конструктивные решения с использованием радиальной, магистральной или смешанной топологии схем.

Параметры, характеризующие топологию схемы даны в табл. 1

Таблица 1

Параметры, характеризующие топологию схемы

| Параметр | Критерий рациональности | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| | Рациональная топология | Магистральная топология |
| 1. Количество электроприемников | Менее 9 | Более 3 |
| 2. Токи нормальных режимов электроприемников | Более 10 А | Менее 10 А |
| 3. $\frac{P_{\text{расч.рез.}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{расч.}i}}$, ($P_{\text{расч.рез.}}$ - результирующая активная расчетная нагрузка группы электроприемников; $P_{\text{расч.}i}$ - расчетная активная мощность электроприемника; $i=1,2$; n - число электроприемников в группе) | Более 0,8 | Менее 0,8 |
| 4. Интервал варьирования расчетных активных мощностей отдельных электроприемников | Любой | 3 : 1 |
| 5. Отношение $r_{\text{ц}} / \Delta r$ ($r_{\text{ц}}$ - расстояние от центра потребления нагрузок до источника питания; Δr - расстояние между крайними электропотребителями в направлении r) | Менее 1,0 | Более 0,5 |

Материалы методы

Трансформаторы 6-10/0,4 кВ потребляют значительную долю реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения, состоящей из мощности намагничивания Q_0 и мощности рассеяния $Q_{\text{рас}}$ (1).

$$Q = Q_0 + Q_{\text{рас}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right), \quad (1)$$

где Q_0 – мощность намагничивания; $Q_{\text{рас}}$ – мощность рассеяния; $S_{\text{номТ}}$ – номинальная мощность трансформатора; I_{XX} – ток холостого хода; U_K – напряжение короткого замыкания; k_3 – коэффициент загрузки.

$$k_3 = \frac{S_{\text{нагр}}}{S_{\text{номТ}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки.

Преобразуем выражения для расчета коэффициента мощности присоединенных потребителей с помощью математических преобразований (3), (4) и определим коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\phi$:

$$S_{\text{нагр}} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = \sqrt{S_{\text{нагр}}^2 - Q^2}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{нагр}} &= S_{\text{номТ}} \cdot k_3 \\ \text{tg}\phi &= \frac{Q}{P} = \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{нагр}}^2 - Q^2}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{номТ}}^2 \cdot k_3^2 - S_{\text{номТ}}^2 \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{\text{номТ}}^2 \cdot \left(k_3^2 - \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2 \right)}} = \\ &= \frac{S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)}{S_{\text{номТ}} \cdot \sqrt{\left(k_3^2 - \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2 \right)}} \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) определим:

$$\text{tg}\phi = \frac{\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2}{\sqrt{k_3^2 - \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right)^2}}, \quad (5)$$

Известно, что величина реактивной мощности, потребляемая цеховыми трансформаторами, зависит от их загрузки (1,2). Для анализа потребления реактивной мощности трансформаторами в зависимости от их загрузки по (2) определим значения $\text{tg}\phi$ для ТМ и ТСЗ-10/0,4 кВ.

По расчетным данным получены графики $\text{tg}\phi = f(k_3)$ (рис.1).

Характер изменения $\text{tg}\phi$ от загрузки подчиняется похожим законам в выделенных диапазонах вариации номинальной мощности трансформаторов. При этом графики кривых $\text{tg}\phi = f(k_3)$ хорошо аппроксимируются степенной функцией. На рис. 1 приведены графики зависимости $\text{tg}\phi = f(k_3)$ трансформаторов ТМ и ТСЗ-10/0,4 кВ.

Зависимости (рис.1) иллюстрируют, что $\text{tg } \varphi$ уменьшается при увеличении загрузки трансформаторов.

Графики показывают, что при изменении загрузки от 0,4 до 1 величина $\text{tg } \varphi$ остается практически постоянной. При уменьшении загрузки ниже 0,3, величина коэффициента мощности существенно увеличивается, что характеризует увеличение потребляемой реактивной мощности, основная доля которой соответствует мощности намагничивания.

Кривые зависимостей $\text{tg } \varphi = f(k_3)$ иллюстрируют, что потребляемая цеховыми трансформаторами реактивная мощность определяется величиной их номинальной мощности, $S_{\text{номТ}}$ при снижении $S_{\text{номТ}}$ возрастает относительная величина расходуемой реактивной мощности.

В настоящее время приобретает важное значение постановка задачи незначительной загрузки электроустановок внутривзаводского электроснабжения [2-3]. Снижение загрузки цеховых трансформаторов ведет к увеличению потребления реактивной мощности, следовательно, энергетическому персоналу требуется контролировать эксплуатационные характеристики трансформаторов с рациональной загрузкой- с целью снижения требуемой реактивной мощности, а также для уменьшения потерь активной мощности холостого хода[2].

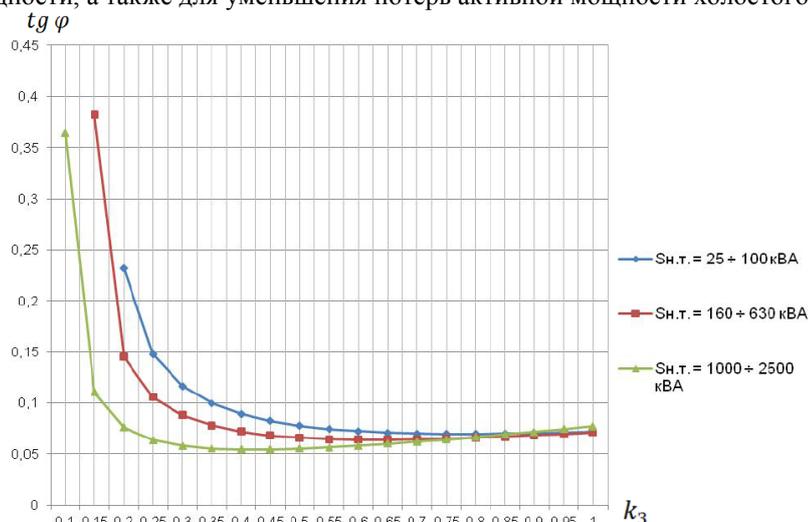


Рис.1 Зависимости коэффициента мощности($\text{tg}\varphi$) от загрузки(k_3) трансформаторов ТМ и ТСЗ для $S_{\text{номТ}}=25\div 2500\text{кВ}\cdot\text{А}$

Как известно, потери электроэнергии в трансформаторах подразделяются на условно-постоянные и переменные.

Условно-постоянные потери рассчитываются по паспортным данным и определяются продолжительностью рабочего периода. Данный вид потерь учитывается при определении тарифов за передачу электроэнергии потребителям.

Величина переменных потерь рассчитывается в натуральном измерении, а также в процентах по отношению к отпуску электроэнергии в сеть и учитывается при определении платы за передачу электроэнергии потребителям.

Поскольку оценочные методы определения нормативов потерь не учитывают существенные факторы и характеристики оборудования, возможно применение уточненных схемно-технических методов при наличии требуемых исходных данных.

В настоящее время существует тенденция увеличения потерь мощности холостого хода в трансформаторах, находящихся длительное время в эксплуатации по сравнению с их номинальными паспортными данными.

По утверждению же конструкторов, разрабатывающих трансформаторы, величина потерь холостого хода в период работы возрастает приблизительно на 4-6 % в течение времени эксплуатации 20-30 лет.

Наиболее значительными факторами роста потерь мощности холостого хода трансформаторов принято считать следующие:

- старение стальных конструкций вследствие нагревания магнитопроводов;
- механические причины воздействий на стальные конструкции (вибрационные и другие);

- старение магнитопровода, вследствие чего межлистовая изоляция нарушается и повреждается;
- нарушение изоляционных материалов шпилек;
- усадка стальных конструкций в магнитопроводе, ввиду чего ослабляется его прессовка, а также ослабляется опрессовка стыковых конструкций.
- старение и нарушение целостности материалов стыковых прокладок.

В случаях несоблюдения условий эксплуатации и нарушения температурных режимов возникает перегрев отдельных элементов трансформатора. При этом, если температура перегрева существенно превышает допустимые значения, то происходит значительное ухудшение магнитных параметров стальных элементов сердечника и растут потери мощности холостого хода.

В современных условиях при наблюдающемся росте электропотребления на промышленных предприятиях, значительное число трансформаторов работают с перегрузкой, при этом увеличивается износ изоляции.

При длительных эксплуатационных периодах происходит ухудшение диэлектрических изоляционных характеристик обмоток. В случае возникновения вибрации, характеристики износа резко ухудшаются для практически каждого элемента конструкции трансформаторов.

В системах электроснабжения с несимметричными приемниками электроэнергии, присоединенными к силовым трансформаторам, велика вероятность появления магнитных потоков нулевой последовательности, и, как следствие, возникновение дополнительных потерь мощности холостого хода. При этом происходит рост суммарных потерь мощности холостого хода.

При работе трансформаторов необходимо контролировать их технические характеристики и соблюдать регламент осмотров и технического обслуживания. Нерациональные и неэффективные ремонтные работы приводят к необоснованным затратам и ухудшению качества функционирования.

В настоящее время в системах электроснабжения существует тенденция увеличения уровня потерь электроэнергии, поэтому уменьшение потерь в трансформаторах даже на несколько процентов даст значительный экономический эффект.

Для получения рациональных режимов эксплуатации трансформаторов недогруженные цеховые трансформаторы заменяют на трансформаторы, рассчитанные на меньшую номинальную мощность, переключают потребителей, питающихся от малозагруженных трансформаторов на установленные рядом с нагрузкой трансформаторы, а также отключают трансформаторы на период эксплуатации в режиме холостого хода. Вышеперечисленные способы повышения эффективности эксплуатации трансформаторов, оптимизируют их загрузку и обеспечивают рациональные и технические параметры внутризаводских электрических систем [11-15].

Вид графиков (рис.1) иллюстрирует нерациональное применение неоптимально загруженных трансформаторов.

Проведенные исследования показывают, что трансформаторы ТМ и ТС3-10/0,4 кВ имеют оптимальные загрузки по критерию минимума потребляемой реактивной мощности в зависимости от номинальной мощности трансформаторов (табл. 2).

Проведем технико-экономическое сопоставление вариантов схем электроснабжения при установленных двух трансформаторах меньшей мощности вместо одного для определения целесообразности такой замены.

Таблица 2

Оптимальные загрузки по критерию минимума потребляемой реактивной мощности в зависимости от номинальной мощности трансформаторов

| Диапазон изменения номинальной мощности трансформаторов | Коэффициент загрузки трансформатора |
|---|-------------------------------------|
| $S_{номТ.}=25\div160 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ | более 0,6 |
| $S_{номТ.}=250\div1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ | более 0,5 |
| $S_{номТ.}=1600\div2500 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ | более 0,3 |

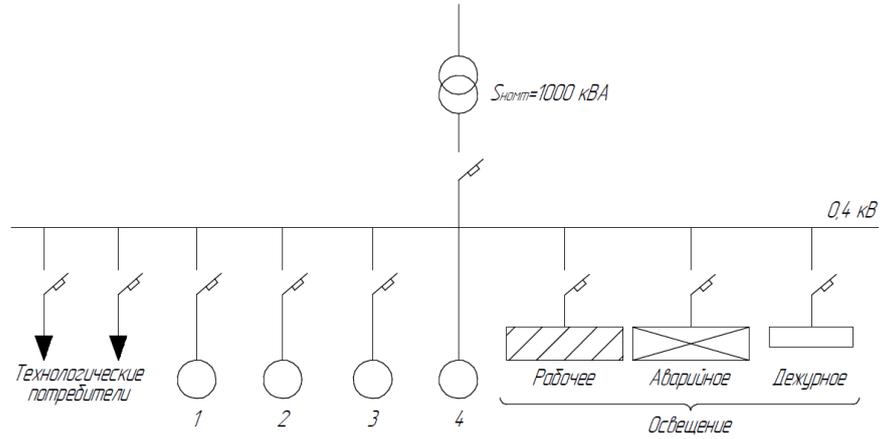


Рис.2 Схема электроснабжения при установке одного трансформатора с $S_{номТ}=1000$ кВ.А, 1 - вентиляторы, 2 - компрессоры, 3 – насосы, 4 – сварочное электрооборудование

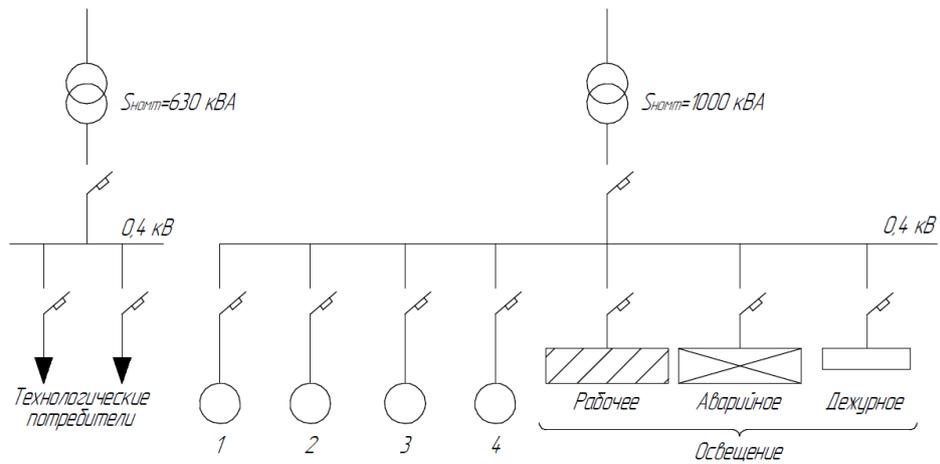


Рис.3. Схема электроснабжения при установке двух трансформаторов с $S_{номТ} = 630$ кВ·А и $S_{номТ} = 250$ кВ·А

Режим работы рассматриваемого производственного участка – в одну смену. Мощность потребителей подстанции имеющих круглосуточный режим питания составляет 20-25% от общей нагрузки участка. Номинальная мощность цеховых трансформаторов составляет: в схеме (рис.2) $S_{номТ} = 1000$ кВ·А, в схеме (рис.3) $S_{номТ} = 630$ кВ·А и $S_{номТ} = 250$ кВ·А (паспортные данные исследуемых трансформаторов представлены в табл. 3).

Для вычислений используем: расчетный период недельного цикла – 168 ч., интервал расчетного периода рабочих суток – 9 ч., рабочий период $T_{рабоч} = 45$ ч., нерабочий период $T_{нерабоч} = 123$ ч., расчетная мощность нагрузки потребителей $P_p = k_3 \cdot S_{номТ}$, потери активной мощности в распределительной сети высокого напряжения $\Delta P_C = \Delta P_a + \Delta P_p = (I_a + I_p)^2 \cdot R_{ПР} = (3 \div 4)\%$ от P_p (статистические данные [2, 3]), где I_a , ΔP_a – активные величины тока и потерь мощности трансформатора; I_p , ΔP_p – реактивные величины тока и потерь мощности трансформатора.

Таблица 3

| $S_{номТ},$ кВ·А | $U_1/U_2,$ кВ | Потери, кВт | | $I,$ % |
|------------------|---------------|--------------|--------------|--------|
| | | ΔP_x | ΔP_k | |
| 1000 | 10/0,4 | 3,3 | 11,6 | 3 |
| 630 | 10/0,4 | 2,27 | 7,6 | 2 |
| 250 | 10/0,4 | 1,05 | 3,7 | 2,3 |

Определим потери электроэнергии в цеховых трансформаторах для схем (рис. 2 и 3).
 Рассчитаем потери мощности в трансформаторах

$$\Delta P_T = \Delta P_X + \Delta P_k \cdot k_3^2, \quad (6)$$

Суммарная величина потерь мощности определяется суммой потерь рабочего и нерабочего интервала времени.

$$\Delta P_{\text{рабоч}} = \Delta P_T + \Delta P_C, \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{нерабоч}} = \Delta P_T' + \Delta P_C', \quad (8)$$

$$\Delta Q_{\text{рабоч}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_3^2 \right) \quad (9)$$

$$\Delta Q_{\text{нерабоч}} = S_{\text{номТ}} \cdot \left(\frac{I_{XX}}{100} + \frac{U_K}{100} \cdot k_{3,\text{нерабоч}}^2 \right), \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{рабоч}}$, $\Delta P_{\text{нерабоч}}$, – потери активной мощности за рабочие и нерабочие интервалы времени; $\Delta Q_{\text{рабоч}}$, $\Delta Q_{\text{нерабоч}}$ – потери реактивной мощности за рабочие и нерабочие интервалы времени;

$$\Delta P_C' = 0,03 \cdot \left(\frac{S_{\text{номТ}}}{U_2} \right)^2 \cdot R_{\text{П.П}} \cdot \Delta P_T' = \Delta P_X + \Delta P_K \cdot k_{3,\text{нерабоч}}^2;$$

$k_{3,\text{нерабоч}}^2$ – коэффициент загрузки трансформатора в нерабочие интервалы времени.

$$\Delta W = \Delta P_{\text{рабоч}} \cdot T_{\text{рабоч}} + \Delta P_{\text{нерабоч}} \cdot T_{\text{нерабоч}}, \quad (11)$$

$$\Delta V = \Delta Q_{\text{рабоч}} \cdot T_{\text{рабоч}} + \Delta Q_{\text{нерабоч}} \cdot T_{\text{нерабоч}}, \quad (12)$$

где ΔW – суммарные потери активной электроэнергии, ΔV – суммарные реактивные потери электроэнергии.

Результаты расчетов приведены в табл. 4. Общая величина суммарных потерь электроэнергии в трансформаторе для схемы на рис. 2 составили $\Delta W=1987,2\text{кВт}\cdot\text{ч}$, $\Delta V=6439,7\text{кВар}\cdot\text{ч}$, а для схемы на рис. 3 составили $\Delta W=1606,4\text{кВт}\cdot\text{ч}$, $\Delta V=2909,04\text{кВар}\cdot\text{ч}$.

Результаты исследований показали, что для схемы отдельного питания потребителей от двух трансформаторов, экономия электроэнергии за рабочий интервал времени в одну неделю составит $380,8\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ и $3530,7\text{кВ}\cdot\text{Ар}\cdot\text{ч}$.

Таблица 4

Общие потери электроэнергии в трансформаторах

| Вариант | $S_{\text{номТ}}$, кВ·А | $S_{\text{рп}}$, кВ·А | k_3^2 | I_m , А | $\Delta P_{\text{рабоч}}$, кВт | $\Delta P_{\text{нерабоч}}$, кВт | $\Delta Q_{\text{рабоч}}$, кВар | $\Delta Q_{\text{нерабоч}}$, кВар | ΔW , кВт·ч | ΔV , кВар·ч | tgφ |
|---------|--------------------------|------------------------|---------|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|------|
| 1 | 1000 | 700 | 0,5 | 1843 | 30 | 5 | 56,95 | 31,43 | 1987,2 | 6439,7 | 0,09 |
| 2 | 630 | 539 | 0,7 | 1419 | 24 | - | 37,89 | - | 1076,50 | 1705,06 | 0,07 |
| | 250 | 160 | 0,4 | 432 | 7 | 1 | 10,3 | 5,99 | 529,90 | 1203,98 | 0,07 |

Результаты и обсуждения

Рассчитав экономию, при известной стоимости электроэнергии и электроустановок проведем технико-экономическое сравнение и покажем целесообразность переключения питания потребителей на два трансформатора.

Рассматриваемые схемы внутризаводского электроснабжения рекомендуются на одноменных предприятиях, но эффективность эксплуатации модернизируемой электрической системы внутризаводского электроснабжения рассчитывается при помощи технико-экономического сопоставления.

Для исследуемой схемы величина стоимости экономии электроэнергии за годовой период эксплуатации составляет:

$$C = \Delta W \cdot N \cdot C_{0a} + \Delta V \cdot N \cdot C_{0p} = 380,8 \cdot 52 \cdot 3,9 + 3530,7 \cdot 52 \cdot 4,9 = 1053,29 \text{ тыс.руб.},$$

где $N=52$ – количество недель в годовом интервале времени; $C_{0a}=3,9\text{руб.}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; $C_{0p}=4,9\text{руб.}/\text{кВ}\cdot\text{Ар}\cdot\text{ч}$ – стоимость 1 кВ·Ар·ч электроэнергии.

Общая стоимость подключения трансформаторов к электрической сети с учетом стоимости монтажных и пуско-наладочных работ составит:

$$C_{T630} + C_{T250} = 348000 + 177000 = 525 \text{ тыс.руб.}$$

Величина возможной прибыли от реализации трансформатора $S_{\text{ном.}}=1000$ кВ·А составит 196500 руб.

Капиталовложения определяются:

$$K = (C_{T630} + C_{T250}) - C_{T1000} = 525000 - 196500 = 328,5 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 5

| Сравнение схем внутриводского электроснабжения | |
|---|--|
| Схемы электроснабжения промышленных предприятий | |
| Достоинства | Недостатки |
| Питание технологических и круглосуточных потребителей от одного цехового трансформатора | |
| 1. Снижение количества трансформаторов и, следовательно, снижение общих суммарных затрат на сооружение подстанции. | 1. Увеличение потерь электроэнергии в трансформаторе в нерабочий период. |
| 2. Не требуется частое включение и отключение работающих трансформаторов. | 2. Ухудшение показателей качества электроэнергии в электрической сети освещения из-за влияния технологических электропотребителей. |
| 3. Относительная простота электрической схемы и относительно низкая стоимость при строительстве и проведении монтажа и пусконаладочных работ. | 3. Снижение параметров надежности схемы вследствие питания технологических потребителей и вспомогательных приемников электроэнергии (систем освещения, вентиляции и т.д.) от одного трансформатора, выход из строя которого, может привести к нарушению электроснабжения потребителей. |
| Питание силовой и вспомогательной нагрузки от разных трансформаторов, имеющих меньшую номинальную мощность | |
| 1. Отсутствуют дополнительные потери электроэнергии в системе электроснабжения в течение нерабочих интервалов времени. | 1. Увеличивается количество трансформаторов, что несколько усложняет схему электроснабжения. |
| 2. Увеличение показателей качества электроэнергии в сетях освещения. | 2. Возрастает количество включения и отключения трансформаторов. |
| 3. Увеличение надежности питания вспомогательных потребителей. | |

Расчетный срок окупаемости капиталовложений определяется:

$$T_{\text{OK}} = \frac{K}{C} = \frac{328,5}{1053,29} \approx 0,31 \text{ года.}, \text{ даже по сравнению с «..года»}$$

Заключение

Проведенные исследования показали, что для повышения эффективности эксплуатации систем внутриводского электроснабжения целесообразно производить замену одного трансформатора, питающего цеховую технологическую и круглосуточную нагрузку потребителей на два трансформатора с меньшей суммарной номинальной мощностью с учетом их оптимальной загрузки. Предлагаемые мероприятия позволяют снизить суммарные потери электроэнергии и уменьшить эксплуатационные издержки.

При этом срок окупаемости разработанных мероприятий по экономии электроэнергии для рассматриваемого примера составил 3,7 месяца. Также выделение технологической нагрузки и присоединение ее к отдельному трансформатору позволит улучшить показатели качества электроэнергии при эксплуатации как технологической, так и круглосуточной нагрузки потребителей внутриводского электроснабжения.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017.168 с.
2. Скоморохов П.И., Зацепина В.И.. Проблемы оптимизации качества электроэнергии в распределительных электрических сетях // Сборник статей 18 международной научно-практической конференции «Advances in science and technology» 31.01.19.. М.: Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», Ч. 1. 2019. С.102-103.
3. Скоморохов П.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного

характера на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2019. Т.25. № 4. Тамбов: Из-во ТГТУ. С.559-565.

4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.

5. Powering. Reliable. Future. Yesterday, todayandtomorrow. RWEAnnual Report (2017). Essen, Germany: RWEAktiengesellschaft.

6. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 57. pp. 302-318

7. Busom N, et al. Efficient smart metering based on homomorphi cencryption // Computer Communications. 2016. V. 82. pp.95-101.

8. Конюхова Е.А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры). Издательство «Кнорус», 2016.

9. Скоморохов П.И. Оценка безотказности систем электроснабжения с продолжительным режимом работы. Молодежь и 21 век: Материалы 5 Международной молодежной научной конференции 26-27.02.15. Т. 3. 2015. Курск: Юго-Зап. Государственный университет, ЗАО «Университетская книга», с. 237-240.

10. Конюхова Е.А. Экономико-математическая модель рабочей части системы электроснабжения объекта на среднем и низком напряжении. Электричество. 2018, № 9.

11. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. Secon Edition. CRCPress, 2007.

12. Инновации и развитие. Россети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017.

13. Lasso, H., Ascanio, C., Guglia, M. A model for calculating technical losses in the secondaryenergy distribution network // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition:Latin America. 2006. p.1-6.

14. Сайт Барнаульского трансформаторного завода [Электронный ресурс]. Доступно по: <http://www.aem22.ru>, свободный.

15. Скоморохов П.И., Зацепина В.И. Анализ функционирования систем электроснабжения резкопеременным характером нагрузок // Энергетика. Проблемы и перспективы развития: Материалы 4 Всероссийской молодежной научной конференции. 2019. Тамбов: Из-во ТГТУ, с. 148-149.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Горлов Алексей Николаевич – канд. ехн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение», Юго-Западный государственный университет, г. Курск.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M : RUSAINS, 2017. 168 p.

2. Skomorokhov PI, Zatssepina VI. Problems of optimizing the quality of electricity in distribution electric networks. *Collection of articles of the 18 th International Scientific and Practical Conference Advances in science and technology* 01.31.19. Pt 1. 2019. M.: Scientific and Publishing Center "Actuality. RF ", pp.102-103.

3. Skomorokhov PI. Analysis of the impact of negative network disturbances of a rapidly changing nature on the efficiency of the functioning of power supply systems. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2019;25(4):559-565.

4. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.

5. Powering. Reliable. Future. Yesterday, todayandtomorrow.RWEAnnualReport (2017). Essen, Germany: RWEAktiengesellschaft.

6. Kabalci YA. Survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.2016;57:302-318

7. BusomN, et al. Efficient smart metering based on homo morphi cencryption. *Computer Communications*. 2016;82:95-101.

8. Konyukhova EA. *Design of power supply systems for industrial enterprises* (theory and examples). Knorus Publishing House, 2016.

9. Skomorokhov PI. Reliability assessment of power supply systems with a long operating mode. Youth and the 21st Century: *Proceedings of the V International Youth Scientific Conference* 26-27.02.15. Kursk: South-West. Gos. Un-t., University Book CJSC. 2015;32:37-240.

10. Konyukhova EA. Economic-mathematical model of the working part of the power supply system of an object at medium and low voltage. *Electricity*. 2018;9.

11. WilliamH. Kersting *Distribution System Modeling and Analysis*. Second Edition. CRC Press, 2007.

12. Innovation and development. Rosseti. Electricity. *Transmission and distribution*. 2017.

13. Lasso H, Ascanio C, Guglia MA. Model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. 2006. pp.1-6.

14. Site of Barnaul Transformer Plant [Electronic resource]. Accessed to: <http://www.aem22.ru>.

15. Skomorokhov PI, Zatsepina VI, Skomorokhov PI. Analysis of the functioning of power supply systems with a sharply changing nature of loads. Energy. *Problems and development prospects: materials of the IV All-Russian Youth Scientific Conference*. Tambov: From TSTU. 2019pp. 148-149.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email :grachieva.i@bk.ru.

Alexey N. Gorlov – Southwestern State University, Kursk, Russia.

Zumeira M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

14.02.2020г.



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА TM171PDM27S SCHNEIDER ELECTRIC

В.Р. Иванова, В.В. Новокрещенов, Н.В. Роженцова

**Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия**

vr-10@mail.ru, vitnov@inbox.ru, natalia15969@yandex.ru

Резюме: Системы вентиляции и кондиционирования необходимы для регулирования воздухообмена, поддержания температуры и влажности, обеспечения комфортного микроклимата. Их установка безусловно является актуальной в помещениях различного назначения: на промышленных объектах, в жилых зданиях, в административных учреждениях, складских помещениях и других. В целях эффективного выполнения и качественного функционирования вентиляции необходимо внедрение автоматизированных схем управления работой данных систем, а также использование разнообразного современного оборудования (вентиляционные агрегаты, вентиляционные установки, шумоглушители, воздушные фильтры, воздухонагреватели и др.) для увеличения надежности очистки воздушного пространства и экономичности изготовления системы в целом.

В работе представлены схема и алгоритм эффективного управления технологического процесса вентиляционной системы промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S Schneider Electric. Проведен анализ существующих вентиляционных систем, представлено описание устройств вентиляционных систем, представлен внешний вид стенда, обоснован выбор программируемого логического контроллера, указаны методические рекомендации по приобретению навыков программирования с помощью среды EcoStruxure Machine Expert – HVAC, организовано автоматическое управление приточной вентиляционной системой для литейного цеха промышленного предприятия для целей наглядного изучения элементов систем вентиляции, способов регулирования и контроля параметров в вентиляционных системах. Основной целью создания обучающего стенда выступает изучение настройки и режимов работы автоматизированных систем управления вентиляцией и кондиционированием. В ходе дальнейшего усовершенствования схемы возможно проведение занятий следующего характера: определение статических и динамических характеристик вентилятора; изучение характеристик автоматизированной заслонки; регулирование давления путем управления вентилятором и др.

Ключевые слова: вентиляционная система, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, программируемый логический контроллер TM171PDM27S, алгоритм, приточная вентиляция, очищение воздуха.

Для цитирования: Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Роженцова Н.В. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S Schneider Electric // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 75-85. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE BASED ON THE PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER TM171PDM27S SCHNEIDER ELECTRIC

VR. Ivanova, VV. Novokreshenov, NV. Rozhencova

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Abstract: Ventilation and air conditioning systems are necessary to regulate air exchange, maintain temperature and humidity, and provide a comfortable microclimate. Their installation is certainly relevant in premises for various purposes: at industrial facilities, in residential buildings, in administrative institutions, warehouses and others. In order to effectively carry out and ensure the proper functioning of ventilation, it is necessary to introduce automated control schemes for the operation of these systems, as well as the use of various modern equipment (ventilation units, ventilation units, silencers, air filters, air heaters, etc.) to increase the reliability of airspace cleaning and the cost-effectiveness of manufacturing the system generally.

The paper presents the scheme and algorithm for the effective control of the technological process of the ventilation system of an industrial enterprise based on the TM171PDM27S Schneider Electric programmable logic controller. The analysis of existing ventilation systems is carried out, the description of ventilation systems is presented, the stand's appearance is presented, the choice of a programmable logic controller is justified, methodological recommendations for acquiring programming skills using the EcoStruxure Machine Expert - HVAC environment are presented, automatic control of the supply ventilation system for the foundry of an industrial enterprise is organized goals of a visual study of elements of ventilation systems, methods of regulation and control of parameters in ventilation systems. The main goal of creating a training stand is to study the settings and operating modes of automated ventilation and air conditioning control systems. In the course of further improvement of the circuit, classes of the following nature are possible: determination of the static and dynamic characteristics of the fan; study of the characteristics of an automated damper; pressure regulation by controlling a fan, etc.

Keywords: ventilation system, frequency converter, induction motor, programmable logic controller TM171PDM27S, algorithm, forced ventilation, air purification.

For citation: Ivanova VR, Novokreshenov VV, Rozhencova NV. Development of an algorithm for effective management of the technological process of the industrial enterprise based on the programmable logic controller TM171PDM27S Schneider Electric // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):75-85. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85.

Введение и литературный обзор

Процесс удаления отработанного воздуха из помещения и его замена на внешний носит емкое название – вентиляция. Необходимость создания такого процесса носит обязательный характер. Последнее связано с важностью очистки загрязненного воздуха. Согласно санитарно-гигиеническим условиям пребывания человека в помещении имеется несколько показателей, которые необходимо контролировать и регулировать:

- нормализация уровня углекислого газа для поддержания полноценного обогащения крови и органов человека кислородом;
- нормализация уровня влажности для исключения образования влажных участков на стенах и в углах помещения [1, 2].

Система вентиляции носит сложноорганизованный характер, в которой используются множество видов инженерного оборудования, поэтому для совершенствования и простоты управления такими комплексными решениями есть необходимость использования автоматизации. Она позволит обеспечить работу в соответствии с установленными алгоритмами и производить контроль и мониторинг состояния и работоспособности всех элементов.

В зависимости от площади, конфигурации, местонахождения и назначения кабинетов, офисов, производственных помещений и других вентиляционные системы классифицируются:

- по способу циркуляции воздуха (естественная и принудительная);
- по конструктивному исполнению (канальная и без канальная);

- по назначению (вытяжная, приточная);
- по дополнительному функционалу (вентиляция с подогревом, с фильтрацией) [3-5].

Вентиляционные системы включают большое количество разнообразного оборудования: вентиляторы, которые представляет собой устройства для перемещения воздуха по воздуховодам, вентиляционные агрегаты, вентиляционные установки. Для организации различного способа воздухообмена (общеобменного, местного, аварийного, противодымного) для новых зданий или при реконструкции уже существующих объектов согласно техническому заданию заказчика, руководствуются основным нормативным актом – СНиП 41-01-2003, в котором указаны параметры пожарной, экологической, санитарной безопасности при эксплуатации систем, критерии надежности и энергосбережения. Каждый из способов проектируется согласно определенной технологической схеме процесса. Примерами типовых из них являются следующие:

- приточная вентиляция с одним теплообменным агрегатом (или с двумя теплообменными агрегатами), где реализуется управление приточной системой с водяным нагревателем. Управление осуществляет контроллер, который обеспечивает поддержание заданной температуры и с помощью сигнала с аналогового выхода управляет вентилем (в случае с двумя теплообменными агрегатами контроллер управляет приточной системой с водяным нагревателем и водяным охладителем) [6].

- приточная система вентиляции с рециркуляцией воздуха, в данной схеме контроллер управляет работой воздушной заслонки и водяным нагревателем. При этом поддерживается заданная температура канального воздуха благодаря чему обеспечиваются отдельные настройки для летнего и зимнего периодов [7].

- приточно-вытяжная система вентиляции с роторным рекуператором. В такой системе поддерживается канальная температура воздуха, регулирование которой осуществляется с аналоговых выходов контроллера скоростью вращения роторного рекуператора и вентилями водяного нагревателя [8-10].

- приточно-вытяжная система вентиляции с роторным рекуператором и двумя теплообменными агрегатами. Для реализации такой схемы управления применяется два контроллера, которые образуют более мощную распределенную систему, позволяющую управлять приточно-вытяжной системой с роторным рекуператором, водяным нагревателем и водяным охладителем. Во время работы также обеспечивается поддержание температуры канального воздуха, ее регулирование производится последовательным пропорциональным управлением с аналоговых выходов обоих контроллеров скоростью вращения роторного рекуператора, вентилем водяного нагревателя и вентилем водяного охладителя [9, 11].

- вытяжные установки и вентиляторы. При реализации алгоритмов управления систем с вытяжными установками задают блок условий контроллера, при этом количество вытяжных вентиляторов, подключаемых к контроллеру, определяется наличием свободных дискретных входов-выходов. Также можно сформировать алгоритм управления вытяжными вентиляторами по превышению концентрации пороговых величин вредных газов и паров, подключая к аналоговым входам соответствующие преобразователи [12, 13].

- тепловые воздушные завесы. В такой системе контроллер управляет воздушной тепловой завесой с водяным нагревателем, за основу принята конфигурация приточной установки. В качестве модификации этой конфигурации есть возможность ввести ступенчатое регулирование скорости вентилятора, использовать дополнительный источник обогрева на малой скорости и др. [14, 15].

Конфигурации вышеприведенных схем могут быть изменены по усмотрению пользователя, поэтому вариантов алгоритмов работы вентиляционных систем может быть большое количество.

В работе предлагается схема и алгоритм эффективного управления технологического процесса вентиляционной системы промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера *TM171PDM27S Schneider Electric*. Реализованный алгоритм планируется использовать в качестве наглядного пособия в учебных заведениях для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Материалы и методы

Целью создания стенда является введение в учебный процесс усовершенствованного оборудования и наглядного изучения элементов систем вентиляции, способов регулирования и контроля параметров в вентиляционных системах.

Основной упор в работах по ознакомлению будет сделан на приобретение навыков составления прикладных программ для промышленных контроллеров *Schneider Electric* и организацию автоматического управления вентиляционной системой с помощью программного обеспечения *EcoStruxure Machine Expert - HVAC*.

При проектировании вентиляционных систем промышленных сооружений учитываются ряд требований таких как площадь производственных помещений; высота потолков; категория работ и производственных операций; количество работающих людей в помещении; уровень загруженности промышленного помещения; расположение рабочих мест. Проектирование и расчет осуществляется на этапе подготовки строительной документации в соответствии с Санитарными нормами и правилами (СНиП).

Промышленные объекты и производственные площади оснащаются вентиляционными системами. Такие системы имеют отличия по размерам и наличия специфических элементов. Последнее связано с видом производственных мероприятий, в результате которых происходит выделение различных веществ и загрязнение воздуха. Для обеспечения высокой степени рациональности, избавляющей пользователей от ручного контроля индикаторов, существует необходимость организации автоматизированных вентиляционных систем [5-7].

В работе представлен вариант автоматического управления приточной вентиляционной системой для литейного цеха промышленного предприятия. Эффективная вентиляция литейных цехов является одним из важнейших требований создания оптимальных санитарно-гигиенических условий труда в металлургическом производстве. В связи с тем, что устройство вентиляции в масштабах литейного цеха является дорогостоящим мероприятием, в целях экономии при проектировании производят сочетание двух типов воздухообмена – естественного и принудительного, а также стараются снизить выделение вредных субстанций в воздух за счет современных технологий производства и автоматизации процессов. В настоящее время существует большое количество схемных решений по осуществлению управления работы вентиляционных систем. В работе предлагается внедрение автоматического управления. Основными достоинствами которой могут выступать снижение затрат на электричество; эксплуатацию инженерных устройств; экономию на тепло- и холодопотребления; обеспечение эффективной организации воздухообмена в помещениях за счет задания нужных параметров температур, интенсивности потока, благоприятного микроклимата; полный контроль работы вентиляторов, фильтров и т.п.; защита в аварийных ситуациях за счет интегрированных устройств оповещения, пожаротушения в систему автоматизации [16, 17].

На первом этапе реализации проекта выполнен аналитический обзор известных систем вентиляции, рассмотрены варианты организации таких систем на промышленных предприятиях.

Следующим шагом стал выбор и обоснование оборудования для реализации системы вентиляции. Далее разработаны принципиальная и монтажная схема. По результатам этих этапов определен уровень мощности, производительность, общий вес оборудования, тип и количество элементов, порядок расположения комплектующих системы вентиляции. После этого работа была посвящена построению алгоритма, написанию программы и осуществлению пуско-наладки стенда.

Для осуществления автоматического управления работы стенда выбран программируемый логический контроллер *TM171PDM27S Schneider Electric* (ПЛК). Указанный ПЛК идеально подходит для сложных машин с широкими возможностями передачи данных. В состав серии входит 6 моделей, которые могут использоваться для управления 28-42 встроенными дискретными или аналоговыми входами/выходами [18].

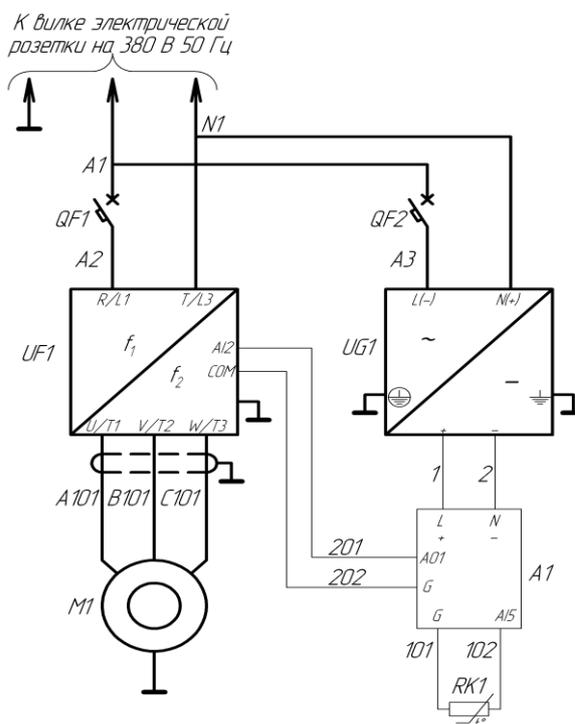
Основным преимуществом ПЛК выступает наличие обширных коммуникационных возможностей и встроенный веб-сервис *Modicon*. Наибольшее применение нашли в шкафах управления насосами, щитах управления вентиляцией, станциях повышения давления, шкафах управления двигателем с частотным преобразователем, в распределительных щитах с АВР с секционированием для построения автоматической логики работы и др. [13, 14].

Все модели данной серии ПЛК выпускаются с двумя видами корпусов: со встроенным дисплеем и с выносным графическим терминалом, могут быть оснащены встроенной *Ethernet*-технологией. Помимо этого, они имеют высокую масштабируемость за счет наличия различных комбинаций встроенных интерфейсов подключения, обладают простотой установки и эксплуатации с удобным алгоритмом запуска системы и с высокой

производительностью.

В силу всех перечисленных преимуществ ПЛК для реализации стенда был выбран именно *TM171PDM27S Schneider Electric*.

Для реализации автоматического управления вентиляционной системой и для показа принципа работы и взаимодействия составляющих элементов в порядке очередности их срабатывания и демонстрации логики, предложена следующая принципиальная электрическая схема, основные элементы схемы с характеристиками представлены в спецификации (рис. 1).



| Обознач. в схеме | Наименование | Тип | Технические данные |
|------------------|------------------------------|-----------------|--|
| QF1, QF2 | Выключатель автоматический | A9F79110 | 1 полюс, номинальный ток 10А, характеристика С, предельная отключающая способность 6кА |
| UF1 | Преобразователь частоты | ATV312H075M3 | Мощность двигателя 0,75 кВт, номинальное напряжение сети 200-240 В, частота сети питания 50-60 Гц, Число фаз сети 3 фазы |
| UG1 | Блок питания | ABL8REM24030 | Выходное напряжение 24 В, выходной ток 3 А |
| M1 | Асинхронный электродвигатель | | Номинальная мощность 0,11 – 0,75 кВт, номинальное напряжение 220/380 В |
| A1 | Программируемый контроллер | TM171PDM27S | Количество входов/выходов: 27 |
| RK1 | Датчик температуры | TM1STPTTSN62030 | Длина кабеля 3 м, IP68 |

Рис. 1. Схема электрическая принципиальная, спецификация

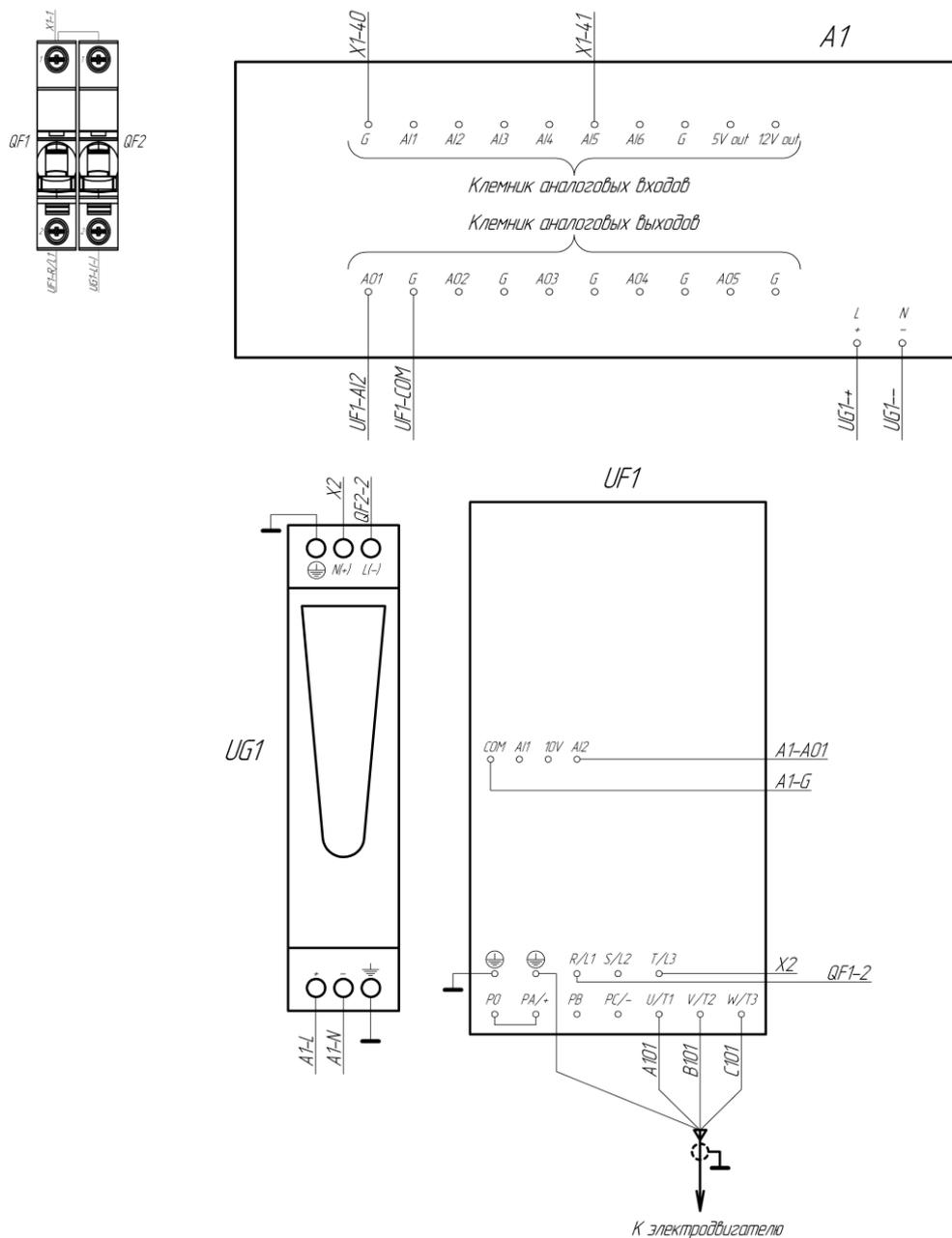
Питание на стенд подаётся посредством трёхфазной вилки, подключаемой к электрической розетке на 380 Вольт (50 Гц). В схеме стенда из трёх фаз присутствующих в розетке подаётся и используется только одна (фаза А). Данное техническое решение (питание однофазного потребителя посредством трёхфазной розетки) было принято с целью исключить возможность инверсии фазы и нуля между собой в схеме стенда посредством возможности двоякого подключения обычной вилки к бытовой розетке.

Для нормальной работы частотного преобразователя *UF1* на его вход требуется подать трёхфазное напряжение 220 Вольт 50 Герц (межфазное значение напряжения). Так же (при соответствующей настройке) предусмотрена возможность питания частотного преобразователя от двух фаз с таким же междуфазным напряжением или однофазным напряжением 220 Вольт 50 Герц. Для проведения практических работ частотный преобразователь запитан однофазным напряжением 220 Вольт 50 Герц. Для защиты входа частотного преобразователя от сверхтоков фаза на его вход подводится через автоматический выключатель *QF1*. К выходу частотного преобразователя подключается асинхронный электродвигатель *M1* [15]. Связь между выходом частотного преобразователя и двигателем осуществляется посредством экранированного кабеля.

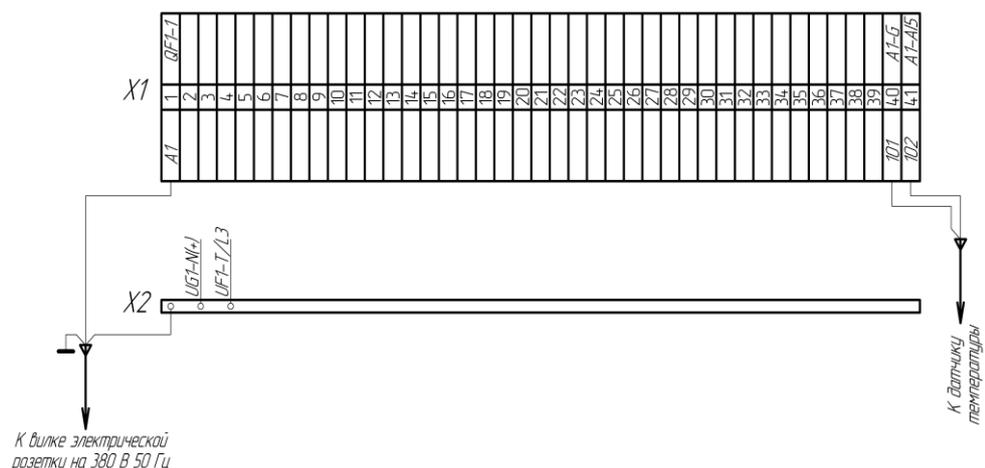
Экран кабеля соединён с корпусом стенда, таким образом, предотвращается излучение помех жилами кабеля при работе частного преобразователя.

Для осуществления обратной связи используется программируемый контроллер A1. Контроллер требует на своём входе постоянное напряжение 24 Вольта, поэтому для его питания используется блок питания UG1. Для защиты входа блока питания от сверхтоков фаза на его вход подводится через автоматический выключатель QF2. Для контроля температуры используется датчик температуры RK1. Он подключается к клеммам аналогового входа контроллера A1. Связь между частотным преобразователем и контроллером осуществляется с помощью канала постоянного тока 0 – 10 Вольт.

На основе принципиальной схемы разработана монтажная схема (рис. 2), которая содержит всю необходимую информацию по производству монтажа электроустановки, включая выполнение электрических соединений (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Схема электрическая монтажная

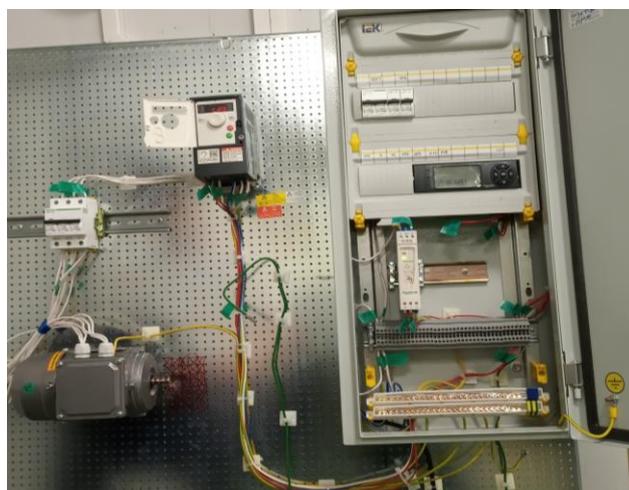


Рис. 3. Внешний вид стенда на этапе сборки

Результаты

С помощью схемы, описанной выше, реализован следующий алгоритм автоматического управления вентиляционной системой для литейного цеха промышленного предприятия. Согласно схемы, необходимо чтобы двигатель вентилятора включался при температуре воздуха в помещении t_1 , а при достижении температуры воздуха в помещении t_2 работал на полную мощность, при этом зависимость скорости вращения вентилятора от температуры воздуха должна носить линейный характер (табл. 1).

Таблица 1.

| °C | Вариант №1 | Вариант №2 | Вариант №3 | Вариант №4 | Вариант №5 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|
| t_1 | 24 | 24,5 | 25 | 25,1 | 25,7 |
| t_2 | 34 | 34,5 | 35 | 36 | 36,3 |

Описание работы схемы. Контроллер A1, в соответствии с записанной в него программой (поддержание нужной температуры в помещении) измеряет сопротивление термодатчика (сопротивление которого пропорционально температуре среды, в которой он находится) и посредством канала постоянного тока 0 – 10 Вольт воздействует на преобразователь частоты. Когда контролируемая температура достигает определённой уставки и начинает её превышать, контроллер подаёт на частотный преобразователь постоянное напряжение с аналогового выхода A01-G. Уровень этого напряжения зависит от частоты и изменяется пропорционально разнице температур окружающей среды и заданной уставке (рис. 4). Скорость вращения вентилятора ограничивается номинальной электрической частотой двигателя – 50 Гц.

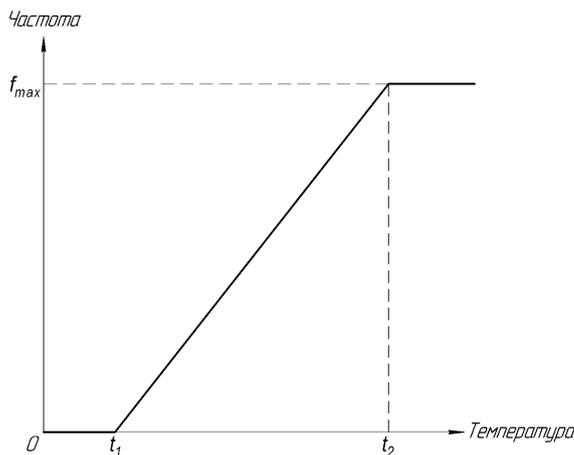


Рис. 4. Зависимость частоты, выдаваемой частотным преобразователем на двигатель, от температуры

Для наглядности и для удобства отслеживания зависимости оборотов двигателя от температуры прямая линейной зависимости имеет значительную протяжённость по оси температуры (10 и более градусов).

Программирование ПЛК *TM171PDM27S Schneider Electric* производилось с помощью среды *EcoStruxure Machine Expert – HVAC*. В пособии по практическим занятиям приведена методика и последовательность выполнения создания программы [22]. Среда *EcoStruxure Machine Expert – HVAC* – это программная платформа, позволяющая производить программирование логических контроллеров *Modicon M171-M172*. Она включает: программирование ПЛК, настройку и расширение шин и сетей, создание экрана дисплеев, настройку коммуникационных модулей BMS на *BACnet MS / TP* (профиль В-ААС), *Modbus SL, Modbus TCP, BACnet MS / TP, BACnet IP* (профиль В-ААС) и *LonWorks (FFT-10)*, выделение библиотек. С помощью данного приложения предлагается описание алгоритма на одном из самых популярных языков программирования ПЛК – графический язык функциональных блочных диаграмм *FBD (Function Block Diagram)*, этот язык использует в своей архитектуре подобие электронной схеме [16-18]. Написанная программа на данном языке для контроллера представляет собой некий список цепей, которые одна за другой выполняется сверху – вниз. К тому же, здесь имеется возможность присвоения отдельным цепям меток, что позволит изменять последовательность исполнения цепей и создавать циклы [19-21].

Реализованная программа на языке *FBD* для задачи автоматизации простейшей вентиляционной системы представлена на рис. 5.

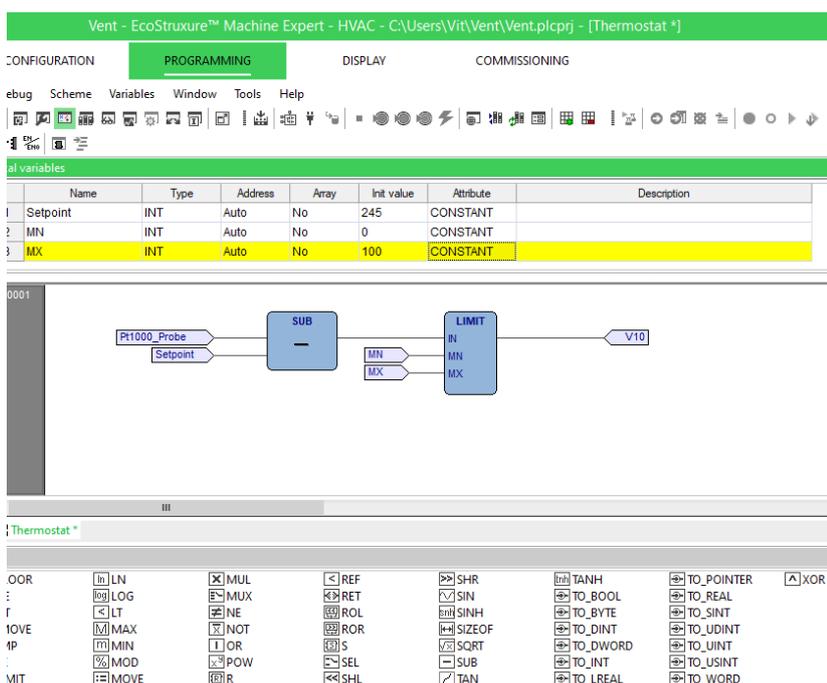


Рис. 5. Программа на языке *FBD*

Выводы

1. Предложенный алгоритм функционирования автоматизированной приточной вентиляционной системы является универсальным, может быть использован в учебном процессе при изучении усовершенствованного оборудования и наглядного представления элементов систем вентиляции, способов регулирования и контроля параметров в данных системах.

2. Основной упор в работах по ознакомлению будет сделан на приобретение навыков составления прикладных программ для промышленных контроллеров *Schneider Electric* и организацию автоматического управления вентиляционной системой с помощью программного обеспечения *EcoStruxure Machine Expert - HVAC*.

Литература

1. Попов Г.А., Нгуен С.М. Автоматизированная система обработки данных в системе управления отоплением, вентиляцией и кондиционированием зданий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617996. Дата регистрации: 01.09.2015.

2. Мальцев И.В. Разработка системы управления процессами воздухораспределения в системе тоннельной вентиляции метрополитена // Сборник трудов «Научный потенциал студентов и молодых ученых», 2016. С. 113-116.

3. Волков А.А., Седов А.В., Чельшков П.Д. Лабораторный стенд моделирования систем автоматического управления системами вентиляции зданий и комплексов. Патент на промышленный образец № 87283, 2013. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

4. Хоук П.Б., Коберштайн М, Джексон Кеннет Дж и др. Система пожаротушения для системы обогрева, вентиляции и кондиционирования транспортного средства. Патент на изобретение № 2676717, 2019. Патентообладатель: Форд Глобал Технолджис, ЛПК.

5. Вентиляция и центральное кондиционирование. [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://bolid.ru/projects/automation-and-dispatching/ventilation/> Ссылка активна на: 19.01.2020.

6. Sewell F.D., Jones B. Heating, ventilation and conditioning unit with automatically controlled water spray air purification system / Environment international. 2016 V. 22. № 2. P. 9.

7. Melkumov V.N., Chuikin S.V. A sheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas // Journal of technology. 2017. V. 32. № 2. pp 139-146.

8. Шведко В.И., Гурьянов Д.В. Моделирование системы вентиляции в системе Desigo insight // Сборник докладов 3 Всероссийской научной конференции «Энергетика. Проблемы и перспективы развития». 2017. С. 304-307.

9. Иванова В.Р., Гараев И.З. Исследование работоспособности асинхронных электродвигателей совместно с преобразователем частоты // Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», 2019. С. 283-286.

10. Ivanova V.R., Fetisov L.V., Bulatov O.A. The analysis of Measurements of Indicators of Quality of the Electric Power and Calculation of Economic Efficiency After Installation of the Booster Transformer 2018. В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. С. 8602756.

11. Иванова В.Р., Фетисов Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. № 9-10. С.120-129.

12. Производительный ПЛК M171, дисп, 27I/O, Modbus, 2SSR [Электронный ресурс]. Доступно по: URL: <https://www.se.com/ru/ru/> Ссылка активна на: 15.12.2019.

13. Новиков Е.А., Крайнова Е.А., Цыфаркин В.И. Применение учебного стенда для изучения частотных преобразователей в учебном процессе // Сборник трудов конференции «Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин». 2016. С. 232-237.

14. Panasetsky D. Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control / D. Panasetsky, A. Osaka, D. Sidorov, Li Young // IFAC-Papersonline 2016. T. 49. № 47. pp. 451-456.

15. Роженцова Н.В., Иванова В.Р., Купоросов А.В. Разработка учебно-лабораторного стенда «Автоматизированная система вентиляции» // Материалы 4 Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» Т.1. 2018. С. 209-210.

16. Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый привод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21 № 5. С. 59-70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>

17. Иванова В.Р., Иванов И.Ю. Разработка критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации активно-адаптивных электроэнергетических систем // Материалы международной научной конференции «Высокие технологии и инновации в науке». СПб: 2018. С. 112-116.

18. Макаров А.Н., Хорошевский Н.Д., Полежаев Н.В., и др. Автоматизированный электропривод с частотным управлением по датчику гидростатического давления // Вестник машиностроения, № 3, 2017. С. 53-10.

19. NG B.F., Xiong J.W., Wan M.P. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems / PLOS ONE, 2017. V.12. № 6. pp. 0178851.

20. Gao R., Wen S., Li A., Zhang H., Du W., Deng B. Anovel low-resistance damper for use within a ventilation and air conditionong system based on the control of energy dissipation / Building and environment, 2019. V. 157. Pp. 205-214.

21. Zhuang C., Wang S., Shan K. Adaptive full-range decoupled ventilation strategy and air-conditioning systems for cleanrooms and buildings requiring strict humidity control and their performance evaluation / Energy, 2019. № 1. Pp 883-896.

22. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В. Лабораторный практикум «Автоматизированные системы управления технологическими процессами». КГЭУ. Казань, 2019. 28 с.

Авторы публикации

Иванова Вилия Равильевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», Казанский государственный энергетический университет.

Новокрещенов Виталий Викторович – аспирант, Казанский гсударственный энергетический университет.

Роженцова Наталья Владимировна – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Popov GA, Nguyen SM. *Automated data processing system in the control system for heating, ventilation and air conditioning of buildings*. Certificate of state registration of computer programs № 2015617996. Registration date: 01.09.2015.

2. Maltsev IV. Development of a control system for air distribution processes in the system of tunnel ventilation of the subway. *Proceedings "The scientific potential of students and young scientists"*, 2016. P. 113-116.

3. Volkov AA, Sedov AV, Chelyshkov PD. *Laboratory stand for modeling systems of automatic control of ventilation systems of buildings and complexes*. Industrial design patent № 87283, 2013. Patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State University of Civil Engineering".

4. Hawk PB, Koberstein M, Jackson J. Kenneth, Fire extinguishing system for heating, ventilation and air conditioning systems of a vehicle. Patent for invention № 2676717, 2019. Patent holder: Ford Global Technologies, LPK.

5. *Ventilation and central air conditioning*. [Electronic resource]. Available at: <https://bolid.ru/projects/automation-and-dispatching/ventilation/> Accessed to: 19. Jan. 2020.

6. Sewell FD, Jones B. Heating, ventilation and conditioning unit with automatically controlled water spray air purification system / *Environment international*.2016;22(2):9.

7. Melkumov VN, Chuikin SV. A sheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas. *Journal of technology*. 2017;32(2):139-146.

8. Shvedko VI, Guryanov DV. Modeling the ventilation system in the Desigo insight system Collection of reports of the 3 All-Russian scientific conference Energy. *Problems and development prospects*. 2017.pp. 304-307.

9. Ivanova VR, Garaev IZ. Investigation of the performance of asynchronous electric motors together with a frequency converter. *Proceedings of the Ist All-Russian Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of the Electric Power Industry and Electrical Engineering"*, 2019. pp. 283 - 286.

10. Ivanova VR, Fetisov LV, Bulatov OA The analysis of Measurements of Indicators of Quality

of the Electric Power and Calculation of Economic Efficiency After Installation of the Booster Transformer. 2018. В сборнике: 2018 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018* 2019. С. 8602756.

11. Ivanova VR, Fetisov LV. Development of a training facility for the efficient and safe operation of backup power supply at industrial enterprises. *Izv. universities. Energy problems*. 2018;9-10:120-129.

12. Productive PLC M171, Dis, 27I/O, Modbus, 2SSR [Electronic resource]. Available at: URL: <https://www.se.com/ru/ru/>. Accessed to: 25. Dec. 2019.

13. Novikov EA, Kraynova EA, Tsyfarkin VI. The use of a training stand for the study of frequency converters in the educational process. *Proceedings of the conference "Actual issues of teaching technical disciplines"*, 2016. pp. 232-237.

14. Panasetky D, Osaka A., Sidorov D, et al. Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control. *IFAC-Papersonline*. 2016;49(47):451-456.

15. Rozhentsova NV, Ivanova VR., Kuporoso AV. Development of a training and laboratory stand "Automated ventilation system". *Proceedings of the 4 National Scientific and Practical Conference "Instrument-Making and Automated Electric Drive in the Fuel and Energy Complex and Housing and Communal Services"*. 2018;1:209-210.

16. Ivanova VR, Kiselev IN. Variable frequency drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Izv. universities. Energy issues*. 2019;21(5):56-70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>.

17. Ivanova VR, Ivanov IYu. Development of evaluation criteria for decisions made in the field of design, creation and operation of actively adaptive electric power systems. *Materials of the international scientific conference "High Technologies and Innovations in Science"*. St. Petersburg: 2018. pp. 112-116.

18. Makarov AN, Khoroshevsky ND, Polezhaev NV, et al. Automated electric drive with frequency control by hydrostatic pressure sensor. *Bulletin of machine building*. 2017;3:53-10.

19. NG B.F, Xiong JW, Wan MP. Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems. *PLOS ONE*. 2017;12(6):0178851.

20. Gao R, Wen S, Li A, et al. Anovel low-resistance damper for use within a ventilation and air conditionong system based on the control of energy dissipation. *Building and environment*, 2019;157:205-214.

21. Zhuang C, Wang S, Shan K. Adaptive full-range decoupled ventilation strategy and air-conditioning systems for cleanrooms and buildings requiring strict humidity control and their performance evaluation. *Energy*. 2019;1:883-896.

22. Ivanova VR, Novokreschenov VV. *Laboratory workshop "Automated process control systems."* KSUE. Kazan, 2019. P. 28.

Authors of the publication

Viliya R. Ivanova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. Email: vr-10@mail.ru.

Vitaly V. Novokreshchenov – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. Email: vitnov@inbox.ru.

Natalia V. Rozhencova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. Email: natalia15969@yandex.ru.

Поступила в редакцию

27.12.2019г.



МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ Q -ТАБЛИЦ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, А.С. Малацион²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ООО «Стэк Мастер», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: В процессе функционирования рабочих комплексов с электромеханическими преобразователями, входящими в их состав, необходимо учитывать влияние эндогенных и экзогенных возмущений, вызывающих отклонения параметров электрических машин от номинальных значений, приведенных производителем в соответствующей документации. Даже незначительные отклонения параметров, находящиеся в допустимых пределах изменения, оказывают заметное влияние на качество функционирования электромеханических преобразователей и рабочих комплексов в целом. В течение жизненного цикла работы электромеханических преобразователей их параметры изменяются в результате естественного износа и старения, что вызывает необходимость непрерывного либо периодического анализа и контроля состояния объектов исследования. В работе рассматривается метод, основанный на вычислении линейного интегрального критерия Q и формировании Q – таблиц, позволяющий обеспечить контроль функционирования электромеханических преобразователей с нестабильными параметрами в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов. Приведены *simulink* – модели систем вычисления линейного интегрального критерия и автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока, позволяющие получить оценки нестабильных параметров. В табличной форме реализованы статические характеристики, отражающие зависимости между параметрами электромеханического преобразователя и линейным интегральным критерием. Результаты проведенного исследования позволяют получить оценки изменения нестабильных параметров электромеханических преобразователей постоянного тока с требуемой точностью.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, *simulink* – модель, контроль параметров, линейный интегральный критерий, эталонная модель, модель чувствительности.

Для цитирования: Малёв Н.А, Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования Q -таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 86-97. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-86-97

Q -TABLES FORMATION METHOD FOR AUTOMATED MONITORING OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS PARAMETERS WITH APPLICATION OF LINEAR INTEGRAL CRITERION

NA Malev¹, OV Pogoditsky¹, AS Malacion²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²LLC «Stek Master», Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: In the process of functioning working sets with electromechanical converters included in their composition, it is necessary to take into account the influence of endogenous and exogenous disturbances that cause deviations of the parameters of electric machines from the nominal values given by the manufacturer in the appropriate documentation. These deviations of the parameters,

even those within the permissible range of changes, have a noticeable effect on the quality of functioning of electromechanical converters and working sets as a whole. During the life cycle of the work of electromechanical converters, their parameters change as a result of natural wear and senescence, which necessitates continuous or periodic analysis and monitoring of the state objects under study. The paper considers a method based on the calculation of the linear integral criterion Q and the formation of Q – tables, which allows monitoring the functioning of electromechanical converters with unstable parameters during operation as part of working sets. Simulink – models of linear integral criterion calculation system and system of automated monitoring of electromechanical DC converter parameters are presented, which allow estimating unstable parameters. In these models static characteristics are implemented in tabular form reflecting the dependencies between the parameters of the electromechanical converters and the linear integral criterion. The results of the study allow us to obtain estimates of changes in the unstable parameters of electromechanical DC converters with the required accuracy.

Keywords: electromechanical converter, simulink – model, monitoring of parameters, linear integral criterion, reference model, sensitivity model.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q -tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):86-97. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-86-97.

Введение

Разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих контроль функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов за счет оценки изменяющегося вследствие влияния дестабилизирующих факторов вектора параметров χ является актуальной и важной задачей [1, 2, 3].

В работе рассматривается метод, позволяющий на основе полученной в результате эксперимента математической модели объекта исследования [4] и последующего определения по данной модели линейного интегрального критерия $Q(\chi)$ [5] сформировать Q -таблицу, по результатам заполнения которой реализуется алгоритм автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей.

Математическая модель объекта исследования может быть описана в любой форме представления и в общем случае представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений в векторной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, \chi); \\ y &= g(x, \chi), \end{aligned} \quad (1)$$

где $f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_n)$, $g = \text{col}(g_1, g_2, \dots, g_l)$ – векторные функции соответствующих аргументов; $y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_l) \in R^l$; $x = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$; $u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$ – векторы выходных координат, переменных состояния и входных воздействий соответственно; $\chi = \text{col}(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v)$ – вектор нестабильных параметров [6, 7].

Наибольшее распространение находят модели объектов исследования в виде линейных дифференциальных уравнений и соответствующих им операторных уравнений с переменными $p \equiv \frac{d}{dt}$ либо передаточных функций $W(s, \chi)$ [8, 9].

Методы

При построении структурной схемы автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей применен беспоисковый градиентный метод с эталонной моделью и моделями чувствительности по анализируемым параметрам с целью получения вектора сигнала невязки ε , пропорционального вариациям параметров [10, 11, 12].

Метод предполагает минимизацию функционала Q невязки ε путем вычисления градиента по варьируемым параметрам $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n\}$. Градиентный алгоритм оценки параметров χ_i из условия достижения минимума функционала Q запишется как:

$$\hat{\chi} = -\Lambda_{\chi} \tilde{N}_{\hat{\chi}} Q[\varepsilon(\chi)], \quad (2)$$

где $\Lambda_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор коэффициентов нормирования.

Для определения компонентов градиента оценочной функции $\nabla_{\hat{\chi}} Q$ следует применить метод вспомогательного оператора [13, 14, 15]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \hat{\chi}_i} = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i} \right)^T \frac{\partial Q}{\partial \varepsilon},$$

где частные производные $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i}$ – элементы матрицы Якоби.

Дифференцируя невязку ε по нестабильным параметрам, получим

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i} = \frac{\partial Y}{\partial \hat{\chi}_i} = \frac{\partial F(\hat{\chi})}{\partial \hat{\chi}_i} u = G_i(\hat{\chi}) u \quad (3)$$

где $F(\hat{\chi})$ – модель объекта исследования, $G_i(\hat{\chi})$ – функция чувствительности к изменениям оценок χ_i . Тогда

$$\nabla_{\hat{\chi}_i} Q = G_i(\hat{\chi}) \left(\frac{\partial Q}{\partial \varepsilon} \right)^T u. \quad (4)$$

Алгоритм вычисления вектора оценок нестабильных параметров $\hat{\chi}$ [16, 17, 18] можно записать как систему вычисления текущих оценок χ_i :

$$\hat{\chi}_i = -\lambda_\chi G_i(\hat{\chi}) \left(\frac{\partial Q[\varepsilon(\hat{\chi})]}{\partial \varepsilon} \right)^T u. \quad (5)$$

Выражения (2) – (5) представляют собой общую форму записи алгоритма контроля нестабильных параметров электромеханических преобразователей. В данной статье рассматривается частный случай решения поставленной задачи и вычисление линейного интегрального критерия Q можно проиллюстрировать структурной схемой, представленной на рис. 1, которая предполагает для описания объекта исследования и других блоков схемы применение аппарата передаточных функций [19, 20].

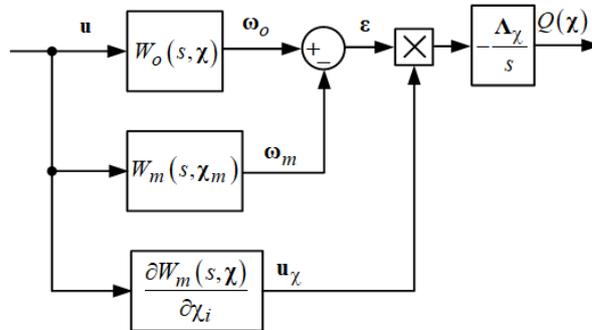


Рис. 1. Структурная схема вычисления линейного интегрального критерия

На схеме приняты следующие обозначения: $W_o(s, \chi)$ – математическая модель объекта исследования; s – оператор Лапласа; χ – вектор параметров объекта; u – вектор входных воздействий; $W_m(s, \chi)$ – эталонная модель объекта; ω_o – вектор выходных координат объекта; ω_m – вектор выходных координат эталонной модели; ε – вектор невязки; u_χ – вектор функций чувствительности; $\Lambda_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор коэффициентов нормирования; $\frac{\partial W_m(s, \chi)}{\partial \chi_i}$ – модель чувствительности по контролируемым параметрам; $Q(\chi)$ – линейный интегральный критерий.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассматривается двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г, математическая модель которого, выраженная через параметры s –

коэффициент противо – ЭДС, R_a – активное сопротивление якоря, L_a – индуктивность якоря, J – момент инерции, представлена динамическим звеном второго порядка:

$$W_o(s) = \frac{1/c}{\frac{L_a J}{c^2} s^2 + \frac{R_a J_{\text{НОМ}}}{c^2} s + 1}. \quad (6)$$

Эталонные значения параметров передаточной функции (6) были определены расчетно-экспериментальным путем [4] и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Эталонные значения параметров двигателя 4ПБ112М2Г.

| Активное сопротивление якоря R_a , Ом | Индуктивность якоря L_a , Гн | Коэффициент противо-ЭДС c , В·с/рад | Момент инерции J , кг·м ² |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1,358 | 0,0108 | 0,63 | 0,0235 |

Модели чувствительности по контролируемым нестабильным параметрам представлены следующими выражениями:

- 1) Модель чувствительности по активному сопротивлению якоря R_a

$$\frac{\partial W_o(s, R_a)}{\partial R_a} = \frac{Jcs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}; \quad (7)$$

- 2) Модель чувствительности по индуктивности якоря L_a

$$\frac{\partial W_o(s, L_a)}{\partial L_a} = \frac{Jcs^2}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}; \quad (8)$$

- 3) Модель чувствительности по моменту инерции J

$$\frac{\partial W_o(s, J)}{\partial J} = \frac{(Ls + R)cs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}. \quad (9)$$

Simulink – модель вычисления линейного интегрального критерия $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$ изображена на рис. 2.

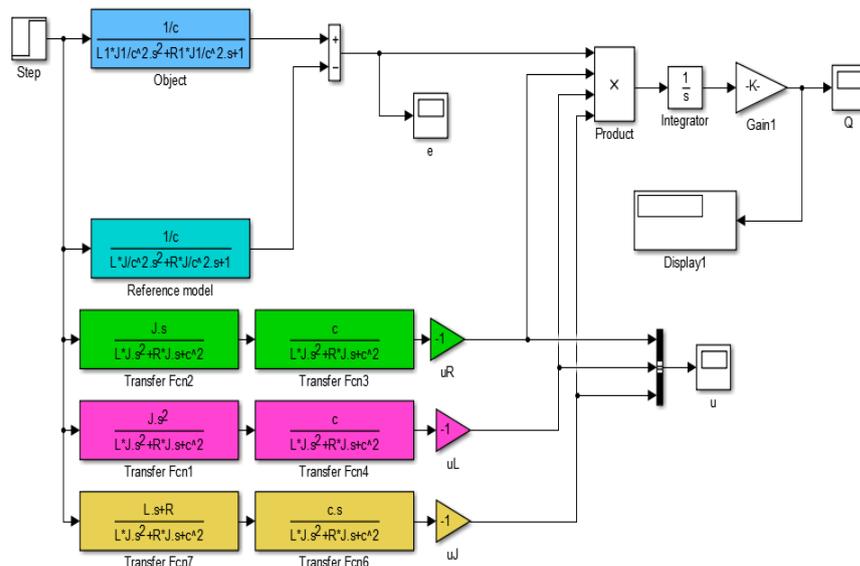


Рис. 2. *Simulink* – модель вычисления линейного интегрального критерия $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$

Моделирование проводилось при следующих заданных вариациях параметров:
 $R_{a,var} = f(R_a; 1, 1R_a; 1, 2R_a)$; $L_{a,var} = f(L_a; 1, 1L_a; 1, 2L_a)$; $J_{var} = f(J; 1, 1J; 1, 2J)$.

Результаты моделирования представлены в виде табл. 2 (Q-таблица).

Таблица 2

Результаты вычисления линейного интегрального критерия $Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$.

| $R_{a,var}$, Ом | $L_{a,var}$, Гн | J_{var} , кг·м ² | $Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$ |
|------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1,358 | 0,0108 | 0,0235 | 0 |
| 1,4938 | 0,0108 | 0,0235 | 1,562 |
| 1,6296 | 0,0108 | 0,0235 | 1,98 |
| 1,358 | 0,01188 | 0,0235 | 2,617 |
| 1,6296 | 0,0108 | 0,0282 | 2,76 |
| 1,6296 | 0,0108 | 0,02585 | 2,997 |
| 1,358 | 0,0108 | 0,02585 | 3,772 |
| 1,4938 | 0,01188 | 0,0235 | 3,773 |
| 1,4938 | 0,0108 | 0,02585 | 3,827 |
| 1,6296 | 0,01188 | 0,0235 | 3,864 |
| 1,6296 | 0,01188 | 0,0282 | 4,418 |
| 1,4938 | 0,0108 | 0,0282 | 4,605 |
| 1,6296 | 0,01188 | 0,02585 | 4,678 |
| 1,358 | 0,01296 | 0,0235 | 5,313 |
| 1,358 | 0,0108 | 0,0282 | 5,794 |
| 1,6296 | 0,01296 | 0,0235 | 5,795 |
| 1,4938 | 0,01188 | 0,02585 | 5,919 |
| 1,4938 | 0,01296 | 0,0235 | 6,041 |
| 1,6296 | 0,01296 | 0,0282 | 6,104 |
| 1,358 | 0,01188 | 0,02585 | 6,271 |
| 1,4938 | 0,01188 | 0,0282 | 6,575 |
| 1,6296 | 0,01296 | 0,02585 | 6,576 |
| 1,4938 | 0,01296 | 0,02585 | 8,058 |
| 1,358 | 0,01188 | 0,0282 | 8,162 |
| 1,4938 | 0,01296 | 0,0282 | 8,581 |
| 1,358 | 0,01296 | 0,02585 | 8,83 |
| 1,358 | 0,01296 | 0,0282 | 10,58 |

Данные в табл. 2 структурированы таким образом, чтобы значения $Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$ в строках располагались от минимального, соответствующего эталонным значениям варьируемых параметров, до максимального.

В полученной Q – таблице количество столбцов зависит от количества ν контролируемых нестабильных параметров исследуемого объекта. Количество строк Q-таблицы k определяется диапазоном изменения нестабильных параметров и требуемой точностью их оценки и вычисляется по следующему выражению:

$$k = \beta^{\nu},$$

$$\beta = \frac{\chi_{i\max} - \chi_{i\min}}{\Delta\chi_i} + 1, \tag{10}$$

где $\chi_{i\max}$ – верхняя граница диапазона изменения i -го нестабильного; $\chi_{i\min}$ – нижняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; $\Delta\chi_i$ – отклонение i -го параметра. Результаты вычислений, представленные в табл. 2, соответствуют значениям

$$\beta = \frac{\chi_{i\max} - \chi_{i\min}}{\Delta\chi_i} + 1 = \frac{1,2 - 1}{0,1} + 1 = 3;$$

$$k = \beta^{\nu} = 3^3 = 27.$$

Следующим этапом рассматриваемого метода автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока является построение статических характеристик вида $\chi_i = f(Q_{\Sigma})$ – χ -зависимостей.

Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, показанную на рис. 3, получим с помощью Q-таблицы за счет выполнения следующей программы:

```
x1=[0 1,562 1,98 2,617 2,76 2,997 3,772 3,773 3,827 3,864 4,418 4,605 4,678 5,313 5,794 5,795
5,919 6,041 6,104 6,271 6,575 6,576 8,058 8,162 8,581 8,83 10,58]; % Q
y1=[1,358 1,4938 1,6296 1,358 1,6296 1,6296 1,358 1,4938 1,4938 1,6296 1,6296 1,4938 1,6296
1,358 1,358 1,6296 1,4938 1,4938 1,6296 1,358 1,4938 1,6296 1,4938 1,358 1,4938 1,358 1,358];
% R
plot(x1,y1)
```

$R_{a,var}$, Ом

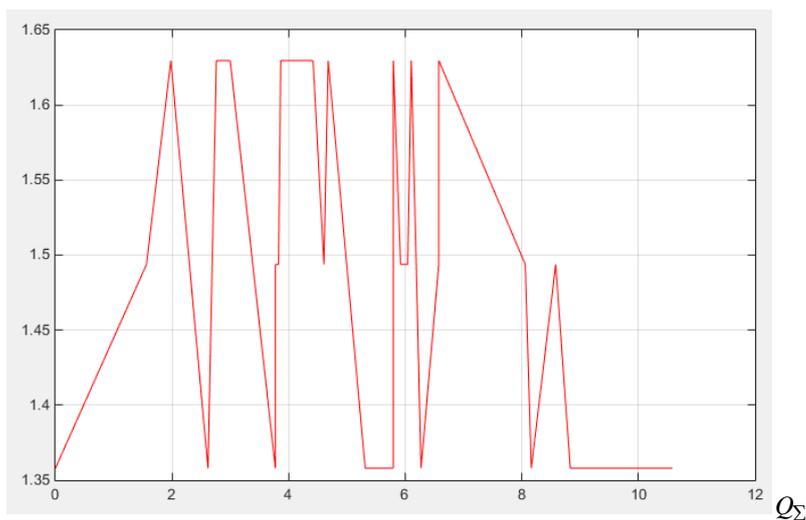


Рис. 3. Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$

Статические характеристики относительно остальных контролируемых параметров получаем аналогичным способом. Соответствующие зависимости представлены на рис. 4, 5.

$L_{a,var}$, Гн

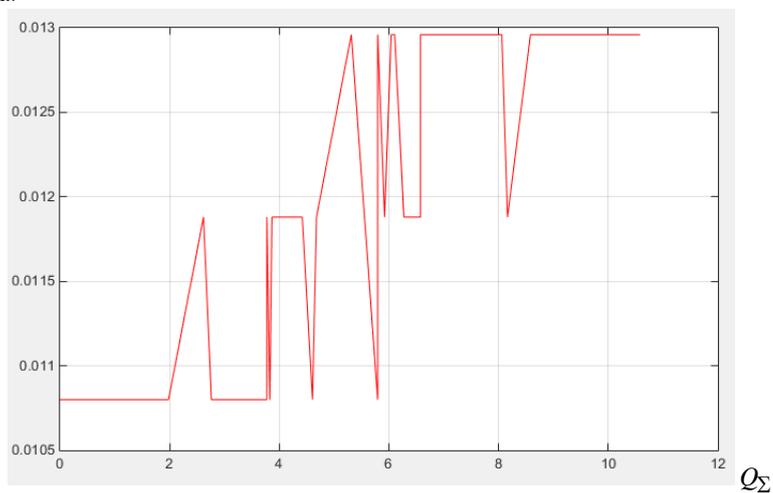


Рис. 4. Зависимость $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$

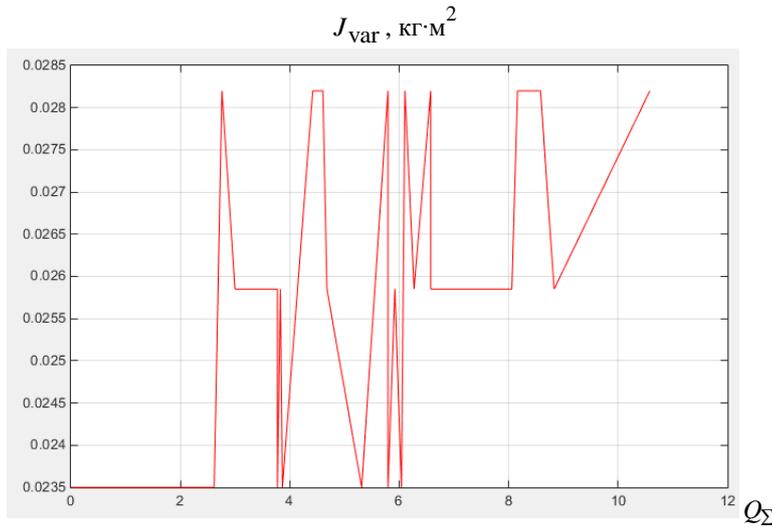


Рис. 5. Зависимость $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$

Simulink – модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока изображена на рис. 6.

Аналогичные расчеты были произведены при следующих заданных вариациях параметров:

$$R_{a,var} = f(R_a; 1, 05R_a; 1, 1R_a; 1, 15R_a; 1, 2R_a);$$

$$L_{a,var} = f(L_a; 1, 05L_a; 1, 1L_a; 1, 15L_a; 1, 2L_a);$$

$$J_{var} = f(J; 1, 05J; 1, 1J; 1, 15J; 1, 2J).$$

Simulink – модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока для случаев $\beta = 3$ и $\beta = 5$ показана на рис. 7, Подсистемы вычисления оценок нестабильных параметров при $\beta = 3$ и $\beta = 5$ представлены на рис. 8.

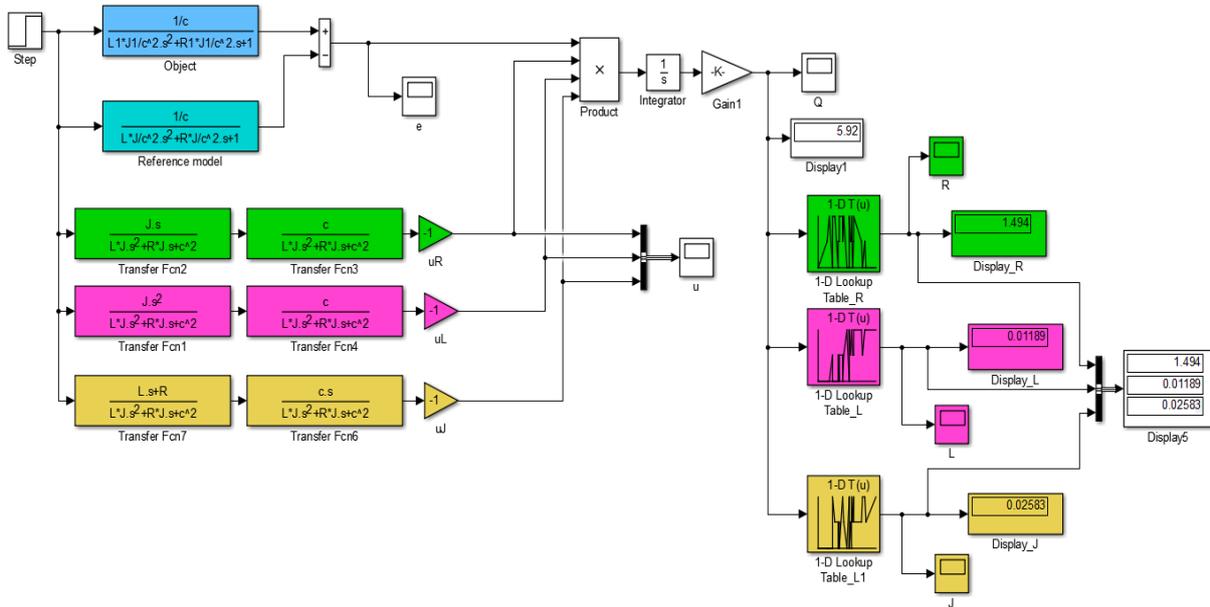


Рис. 6. *Simulink*-модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока

Характеристики $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ реализованы в представленной *Simulink*-модели с помощью блоков одномерных интерполяционных табл. 1 – *D LookupTable* библиотеки *LookupTables*.

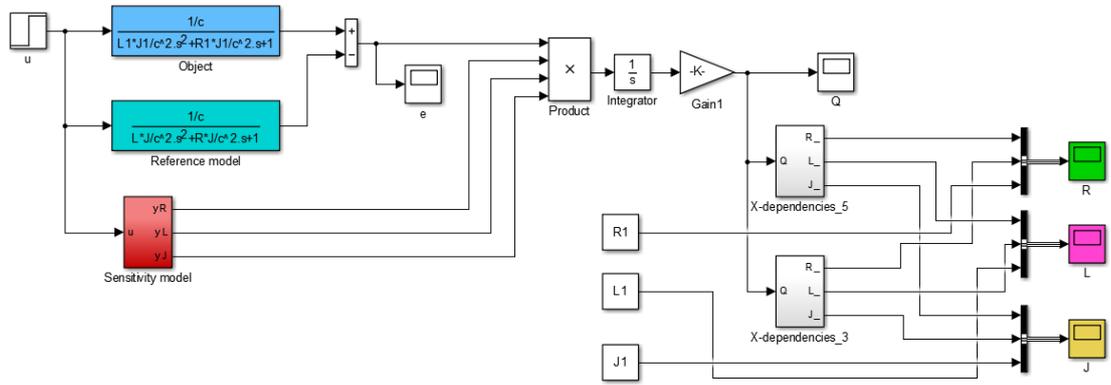


Рис. 7. Simulink-модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока для случаев $\beta = 3$ и $\beta = 5$

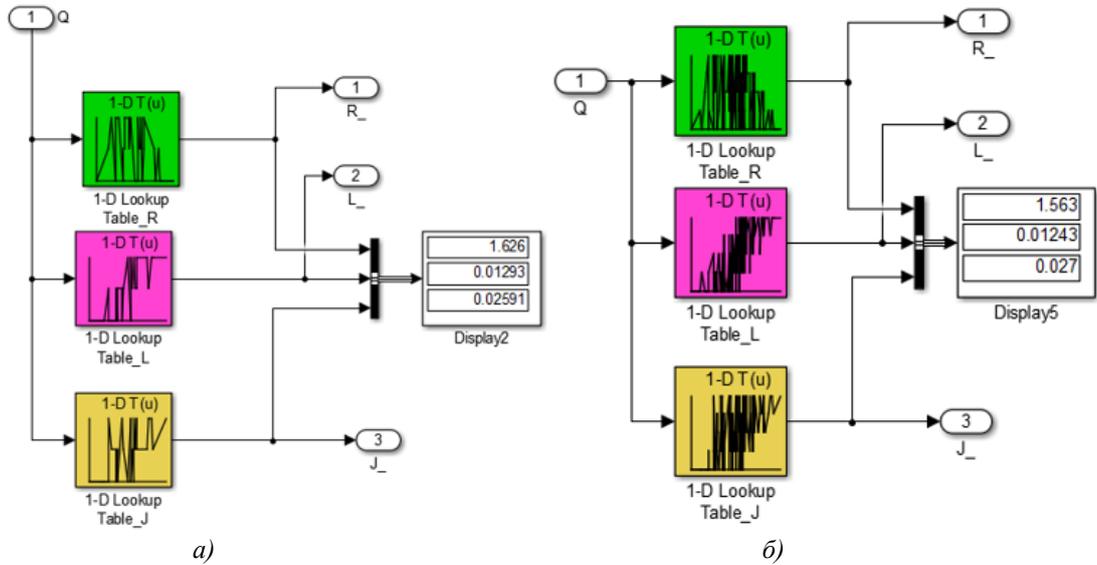


Рис. 8. Simulink-модель подсистем X-dependencies: а) $\beta = 3$; б) $\beta = 5$

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров:

- $R=1,358; L=0,0108; J=0,0235; c=0,63;$
- $R1=1,15 \cdot R; \% 1,5617$
- $L1=1,15 \cdot L; \% 0,01242$
- $J1=1,15 \cdot J; \% 0,027025$

Графики, отражающие процесс текущего контроля параметров, показаны на рис. 9-11.

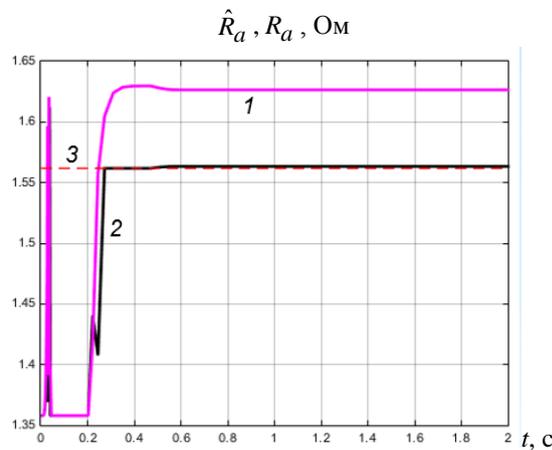


Рис. 9. Зависимости $\hat{R}_a = f(t)$: 1 – оценка активного сопротивления при $\beta = 3$; 2 – оценка активного сопротивления при $\beta = 5$; 3 – заданное значение активного сопротивления

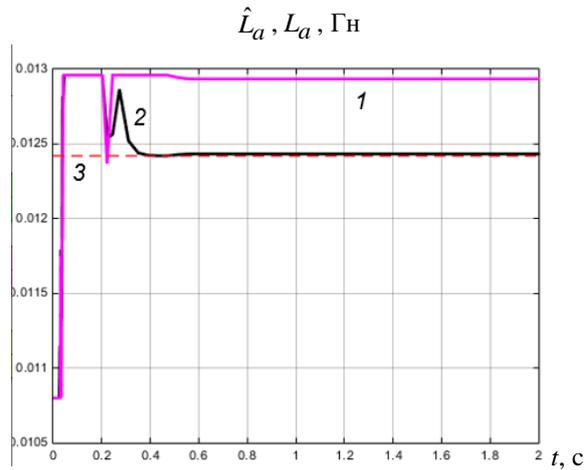


Рис. 10. Зависимость $\hat{L}_a = f(t)$: 1 – оценка индуктивности при $\beta = 3$; 2 – оценка индуктивности при $\beta = 5$; 3 – заданное значение индуктивности \hat{J} , кг·м²

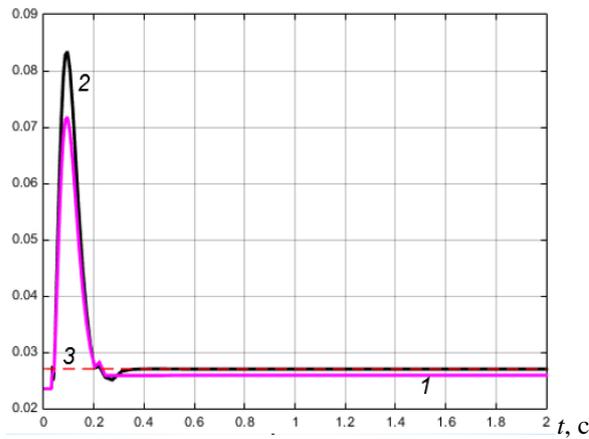


Рис. 11. Зависимость $\hat{J} = f(t)$: 1 – оценка момента инерции при $\beta = 3$; 2 – оценка момента инерции при $\beta = 5$; 3 – заданное значение момента инерции

Из анализа приведенных зависимостей следует, что процесс вычисления оценок параметров электромеханического преобразователя постоянного тока не превышает 0,6 с. Установившиеся значения оценок при $\beta = 3$ составили, соответственно: $\hat{R}_a = 1,637$ Ом; $\hat{L}_a = 0,01286$ Гн; $\hat{J} = 0,0263$, кг·м²; при $\beta = 5$ установившиеся значения оценок совпадают с заданными значениями нестабильных параметров.

Относительные погрешности вычисления нестабильных параметров при $\beta = 3$ $\delta_{R_a} = 4,82\%$; $\delta_{L_a} = 3,54\%$; $\delta_J = 2,68\%$ обусловлены тем, что моделирование проводилось не в «узловых» точках $\chi_{var} = f(\chi; 1,1\chi; 1,2\chi)$, а при изменениях параметров в 1,15 от эталонных значений, тогда как при $\beta = 5$ $\chi_{var} = f(\chi; 1,05\chi; 1,1\chi; 1,15\chi; 1,2\chi)$ моделирование было проведено при $\chi_{ivar} = 1,15\chi_i$, что обеспечило высокую точность оценки параметров двигателя постоянного тока.

Выводы

В настоящей работе рассмотрен метод автоматизированного контроля нестабильных параметров электромеханического преобразователя постоянного тока с применением эталонной модели объекта исследования и моделей чувствительности по активному сопротивлению, индуктивности якорной цепи и моменту инерции. Регистрируемой выходной координатой электромеханического преобразователя является скорость вращения. Метод основан на вычислении линейного интегрального критерия Q , являющегося функцией невязки ε , формировании Q – таблиц и построении χ – зависимостей, позволяющих осуществить оценку нестабильных параметров объекта исследования. Величина погрешности оценки контролируемых параметров на требуемом

интервале их изменения может быть снижена за счет уменьшения заданных отклонений параметров $\Delta\chi_i$ при вычислении линейного интегрального критерия. При этом в соответствии с (10) увеличится количество строк Q – таблицы k и, соответственно, точность контроля параметров объекта исследования. Эталонную модель, модели чувствительности по контролируемым параметрам, алгоритм вычисления линейного интегрального критерия, а также полученные в результате предварительного эксперимента χ – зависимости, целесообразно реализовать в цифровом представлении. На основе метода непосредственного программирования с применением формулы Тастина, и записать в виде программного кода микропроцессора, что обеспечит автоматизацию процесса контроля нестабильных параметров электромеханических преобразователей в режиме реального времени.

Литература

1. Саушев А.В., Широков Н.В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметрических элементов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2016. №. 2 (36), С. 143-156.
2. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review // Electromagnetics. 2006. V. 26. №. 7. pp. 543-569.
3. Тоноян С.А., Балдин А.В., Елисеев Д.В. Прогнозирование технического состояния электронных систем с адаптивными параметрическими моделями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2016. № 6. С.115-125.
4. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., и др. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(4):113-122.
5. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
6. Xu Chen and Masayoshi Tomizuka. New repetitive control with improved steady-state performance and accelerated transient". In: IEEE Transactions on Control Systems Technology 22.2 (2014), pp. 664-675.
7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.
8. A. Gambier, E. Badreddin. Multi-objective optimal control: An overview, in: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore. 2007. pp. 170-175.
9. Cacuci D.G., Fang R. Sensitivity and uncertainty analysis of counter-flow mechanical draft cooling towers I: Adjoint sensitivity analysis // Nuclear Technology. 2017. V. 198. N 2. pp. 85-131.
10. Томчина О.П., Кондратова М.Е., Горохов М.М., и тд. Адаптивный регулятор с нелинейной эталонной моделью – в сборнике: Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации: Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во «Культ Информ Пресс», 2017. С. 206-208.
11. Guda A.I. Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(99). Дніпропетровськ, 2015. С. 3-9.
12. Ramírez A., Garrido R., Mondié S. Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors, in IFAC TDS Workshop (Grenoble, France. 2013). Grenoble, 2013. pp. 558-563.
13. Vunder N.A., Ushakov A.V. Peaks emergence conditions in free movement trajectories of linear stable systems // Proc. 13th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2016. V. 1. pp. 535-538.
14. Polyak B.T., Smirnov G. Large deviations for non-zero initial conditions in linear systems // Automatica. 2016. V. 74. pp. 297-307.
15. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. V. 24, N. 17. pp. 2774-2784.
16. Kuhn Max and Kjell Johnson. "Applied predictive modeling". V. 26. New York: Springer, 2013.
17. Hastie T., Tibshirani R., and Friedman J. Unsupervised learning. In: The elements of statistical learning. New-York: Springer. 2009. pp. 485-585.
18. Afanasiev A.P., Sokolov A.V., Voloshin V.V. "Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment" in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: Collection of Scientific Papers of the 19 International Conference

DAMDID / RCDL'2017 (October 10–13, 2017, Moscow, Russia), etc. Moscow: FRC CSC RAS, pp. 132-140.

19. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.*, V. 31. N. 2. pp. 942-948.

20. Larsson C. A., Annergren M., Hjalmarsson H, et al. "Model predictive control with integrated experiment design for output error systems", in: *Proceedings of European Control Conference, Zurich, Switzerland. 2013. pp. 3790-3795.*

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Малацион Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, начальник отдела автоматизации ООО «Стэк Мастер».

References

1. Saushev AV, Shirokov NV. Diagnosis of the state of electrical systems in the space of parameters of their elements. *Bulletin of the*. 2016;2 (36):143-156.

2. Faiz J, Ebrahimi BV, Sharifian MB. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review. *Electromagnetics*. 2006;26(7):543-569.

3. Tonoyan SA, Baldin AV, Eliseev DV. *Technical State Prediction of Electronic Systems with Adaptive Parametric Models*. Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., 2016;6:115-125.

4. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):113-122.

5. Malev NA, Pogoditsky OV, Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019;1:60-67.

6. Xu Chen and Masayoshi Tomizuka. New repetitive control with improved steady-state performance and accelerated transient". In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014. pp. 664-675.

7. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1:88. Pt 1.

8. Gambier A., Badreddin E. Multi-objective optimal control: An overview in: *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore, 2007*, pp. 170-175.

9. Cacuci DG., Fang R. Sensitivity and uncertainty analysis of counter-flow mechanical draft cooling towers – I: Adjoint sensitivity analysis. *Nuclear Technology*. 2017;198(2):85-131.

10. Tomchina OP, Kondratova ME, Gorokhov M.M., et al. An adaptive controller with a nonlinear reference model – in the collection: Scientific achievements of modern science: novation, history, reality, prospects and implementation practice: *Collection of scientific articles based on the results of an international scientific and practical conference*. St. Petersburg: Publishing House "KultInform-Press", 2017. pp. 206-208.

11. Guda AI, Mikhalyov AI. Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification. System technology. *Regional interuniversity collection of scientific papers*. Dnepropetrovsk, 2015;4 (99):3-9.

12. Ramirez A, Garrido R, Mondié S. *Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors, in IFAC TDS Workshop (Grenoble, France. 2013)*. Grenoble, 2013. pp. 558-563.

13. Vunder NA., Ushakov AV. Peaks emergence conditions in free movement trajectories of linear stable systems. *Proc. 13th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2016;1:535-538.

14. Polyak BT., Smirnov G. Large deviations for non-zero initial conditions in linear systems. *Automatica*. 2016;74:297-307.

15. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.

16. Kuhn Max and Kjell Johnson. Applied predictive modeling. 2013. V. 26. New York: Springer.

17. Hastie T, Tibshirani R, and Friedman J. Unsupervised learning. *The elements of statistical learning*. New-York: Springer, 2009. pp. 485-585. doi:10.1007/978-0-387-84858-7.

18. Afanasiev AP, Sokolov AV, Voloshinov VV. Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment in *Data Analytics and Management in*

Data Intensive Domains: *Collection of Scientific Papers of the 19 International Conference DAMDID / RCDDL'2017* (October 10–13, 2017, Moscow, Russia), etc. Moscow: FRC CSC RAS. 2017. pp. 132-140.

19. Kim S, Overbye TJ. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016;31(2):942-948.

20. Larsson CA, Annergren M, Hjalmarsson H, et al. Model predictive control with integrated experiment design for output error systems. *Proceedings of European Control Conference, Zurich, Switzerland, 2013.* pp. 3790-3795.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E mail: maleev@mail.ru.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Malacion S. Alexey – LLC «Stek Master», Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

05.02.2020г.



ВКЛЮЧЕНИЕ В ПАРОГАЗОВЫЙ ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ИРАКА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ КАК СПОСОБ РЕШЕНИЯ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СТРАНЫ

Ахмед З. Абасс¹, Д.А. Павлюченко², А.М. Балабанов³, В.М. Лесс⁴

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-9656-3403>, balabanov_a_m@mail.ru

ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Резюме: При высоких температурах окружающего воздуха производительность газотурбинных электростанций значительно падает. Технические решения по компенсации потерь связаны с постоянным впрыском воды в воздухозаборник ГТУ. Такой подход не приемлем в регионах с ограниченными запасами пресной воды. Для уменьшения себестоимости генерируемой энергии требуются радикальные решения. Технология интегрированный комбинированный солнечный цикл (ISCCS) хорошо зарекомендовала себя на многих проектах. Дополнение парогазового цикла солнечной энергией позволяет существенно увеличить общий КПД электростанции. Несмотря на рост расходов при строительстве солнечной ее части, общие расходы на эксплуатацию солнечных коллекторов в разы меньше, чем турбинной установки. Учитывая общемировую тенденцию борьбы с выбросами углекислого газа, переход на гибридную схему является экономически привлекательным. Торговля углеродным кредитом выброса CO₂ позволит значительно сократить срок окупаемости строительства модернизации ГТУ по схеме ISCCS. В данной работе представлен вариант модернизации газотурбинной электростанции города Басра (Ирак), с использованием преимуществ солнечного излучения и рециркуляции продуктов сгорания от ГТУ. Предлагается дооснастить существующую ГТУ 200 МВт двумя паротурбинными установками мощностью 75 и 65 МВт, работающих совместно с солнечными коллекторами, вырабатывающими водяной пар низкого давления. Благодаря модернизации, КПД электростанции должен вырасти с 38 до 55%. Пересмотр схемно-технических решений электростанций Ирака позволит производить объем энергии достаточный для региона.

Ключевые слова: газотурбинная установка - CCGT (combined cycle gas turbine); интегрированный комбинированный солнечный цикл – ISCCS (integrated solar combined cycle system); параболический солнечный коллектор - PTC (parabolic rough collector); прямое парообразование - DSG (direct steam generation); парогенератор с рекуперацией тепла - HRSG (heat recovery steam generator).

Для цитирования: Ахмед З. Абасс, Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., Лесс В.М. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-98-107.

INCLUSION OF SOLAR ENERGY IN IRAQ GAS-TURBINE POWER PLANTS AS A METHOD OF SOLVING THE COUNTRY'S ENERGY SYSTEM SHORTAGE

Ahmed Z. Abass¹, D.A Pavlyuchenko², A.M. Balabanov³, V.M. Less⁴

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0003-1836-3435>, theking.amir@mail.ru

ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, pavlyuchenko@corp.nstu.ru

ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-9656-3403>, balabanov_a_m@mail.ru

ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0001-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Abstract: At high ambient temperatures, the performance of gas turbine power plants drops significantly. Technical solutions of compensation for losses associated with the constant injection of water into the air intake of a gas turbine. This approach is not acceptable in regions with limited fresh water reserves. Radical solutions are required to reduce the cost of generated energy. Integrated Combined Solar Cycle (ISCCS) technology has proven itself on many projects. The addition of a combined cycle gas cycle with solar energy can significantly increase the overall efficiency of the power plant. Despite the increase in costs during the construction of its solar part, the total cost of operating solar collectors is several times less than a turbine installation. Given the global trend to fight carbon emissions, switching to a hybrid scheme is economically attractive. Trading in carbon credits for CO₂ emissions will significantly reduce the payback period for the construction of gas turbine modernization under the ISCCS scheme. This paper presents an option to modernize a gas turbine power plant in the city of Basra (Iraq), using the advantages of solar radiation and recycling of combustion products from gas turbines. It is proposed to equip the existing 200 MW gas turbine plant with two steam turbine units with a capacity of 75 and 65 MW, working in conjunction with solar collectors producing low pressure water vapor. Due to modernization, the efficiency of the power plant should increase from 38% to 55%. The revision of the schematic and technical solutions of Iraq power plants will allow producing sufficient energy for the region.

Keywords: CCGT - combined cycle gas turbine; ISCCS - integrated solar combined cycle system; PTC - parabolic trough collector; DSG - direct steam generation; HRSG - heat recovery steam generator.

For citation: Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Balabanov A.M, VM. Less. Inclusion of solar energy in iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage // *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-98-107.

Введение

Сегодня результаты геополитических решений сказываются на качестве жизни целых регионов. Резкий рост цен на нефть или вооруженные конфликты могут стать фатальными для промышленности любой страны, где нет альтернативного топлива.

Так, до 1990 года электроэнергетика Ирака была одной из лучших на Ближнем Востоке. В результате войн и санкций 1990-х и 2003-х годов Иракская электроэнергетическая инфраструктура сильно пострадала. Для сглаживания разрыва между спросом и предложением Ираку необходимо приступить к строительству не менее 5-ти крупных теплоэлектростанций и распределительной сети, включающей 25 подстанций мощностью 400 кВ/250 МВА и 159 подстанций мощностью 132 кВ/3х63 МВА. Для восстановления полноценного функционирования иракской электрической системы и удовлетворения текущего спроса требуется финансирование в размере \approx 20 млрд. долларов [1].

Население Ирака, как ожидается, достигнет 55,85 млн. чел. к 2030 году и прогнозируемый спрос на электроэнергию достигнет 60 000 МВт. Сегодня иракские семьи для компенсации дефицита электроэнергии используют дизель-генераторы [2].

Существующий дефицит требует форсировать поиски других схем генерации с более высокой эффективностью, более низкой себестоимостью кВтч и Гкал, более коротким временем монтажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также с более чистыми источниками энергии. Для того чтобы дать Иракскому электротехническому сектору реальный толчок и догнать растущий спрос, авторы предлагают включить в парогазовый цикл существующих газотурбинных электростанций энергию солнца от солнечных коллекторов.

Только модернизация основных действующих электростанций Ирака с форсированием их мощности выше существующего уровня позволит пересмотреть цены на электроэнергию и преобразовать электроэнергетический сектор в самокупаемую отрасль [1].

Технология преобразования солнечной энергии на сегодня достаточно хорошо изучена, что снижает риски по модернизации электростанций Ирака.

Старейшие в мире промышленные концентраторы солнечной энергии – CSP (*Concentrated Solar Power*) построены на *Solar Energy Generating Systems (SEGS, США)* в 1984 году, а к 1990 году их мощность нарастили в девять раз, до 357 МВт генерируемых

параболическими солнечными коллекторами – *PTC (Parabolic Trough Collector)*. Кроме *SEGS*, в США эксплуатируются еще три солнечных тепловых электростанции суммарной генерирующей мощностью ≈ 810 МВт [3].

Опытная солнечная электростанция комбинированного цикла – *ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System)* была построена *Luz Solar International* в 1990 году. С накоплением опыта эксплуатации в 2000 году *Global Environment Facility* выделило гранты на строительство систем *ISCCS* в Мексике, Марокко, Индии и Египте. В настоящее время количество электростанций *ISCCS* с каждым годом растет. Алжир успешно реализовал *ISCCS* 150 МВт с *CSP* 20 МВт; в Иране *ISCCS* 64 МВт с *CSP* 17 МВт соответственно [3].

Следует отметить, что эффективность преобразования солнечной энергии в тепло и электричество связано с концептуальными инженерными решениями, встречающимися в схемах парогазового цикла: *PTC (Parabolic Trough Collector)*; *SEGS (Solar Electric Generating System)*; *DISS (Direct Solar Steam)*; *ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System)*; *HTF (Heat Transfer Fluids)*; *CRS (Central Receiver System)*; *CC (Combined Cycle)*; *HRSG (Heat Recovery Steam Generator)*; *DSG (Direct Steam Generation)* и другие [4].

Во многих странах эксплуатируются газотурбинные электростанции – *CCGT (Combined Cycle Gas Turbine)*. Например, *CCGT* в ОАЭ, где засушливый субтропический климат с очень жарким летом и теплой зимой, испытывают большие потери, так как выходная мощность газовой турбины уменьшается с повышением температуры окружающей среды [5]. Эта физическая зависимость хорошо известна в авиации. Повышение плотности воздуха зимой широко используется транспортной авиацией при планировании доставок тяжелых грузов. Авиаперевозки зимой позволяют уменьшить разбег воздушного судна и сократить расход топлива. Для повышения мощности ГТУ в теплый и жаркий период года используют впрыск воды в воздухозаборник турбины.

Интеграция солнечной энергетики с природным газом (конкретнее с *CCGT*) получила название *NGCC (Natural Gas Combined Cycle)*, и может рассматриваться как промежуточный шаг на пути к оптимальному использованию возобновляемых источников энергии. Комбинированная система *ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System)* является наиболее перспективной альтернативой обычным солнечным тепловым установкам *CSP* [5].

При правильном выборе схемно-технических решений есть потенциал еще увеличить КПД. Так результаты моделирования показали, что концепция *DSG (Direct Steam Generation)* повышает производительность электростанций Алжира при любом режиме работы в среднем на 4% в течение года по сравнению с *ISCCS* [4].

Работы по повышению КПД гибридных станций так же ведутся и в области теплоносителей. Наиболее распространенным рабочим телом является – вода/пар, расплавленные соли, жидкий натрий или воздух. В 2014 году было предложено новое поколение солей на базе смеси бинарных и тройных эвтектических галоидных солей, таких как $KCl-AlCl_3$ и $NaCl-KCl-ZnCl_2$, которые имеют низкую вязкость и низкое давление пара, что делает их очень перспективными для *HTF (Heat Transfer Fluids)* [6].

Заслуживает внимания переход с *PTC (Parabolic Trough Collector)* на централизованную приемную систему – *CRS (Central Receiver System)* с комбинированным циклом – *CC (Combined Cycle)*. Новая конфигурация объемного приемника солнечной башни *CRS* позволяет парогенератору рекуперации тепла – *HRSG (Heat Recovery Steam Generator)* эффективнее работать в режиме нагрева, что значительно повышает КПД электростанции [7].

Министерство энергетики Ирака уже проанализировало мировой опыт и планирует генерировать за счет *CSP* дополнительно 5500 МВт в общей мощности существующих электростанций. По оценкам иракских инженеров, только одна гибридная электростанция в Аль-Анбар на базе 200 МВт турбины и 50 МВт *CSP* позволит сократить ежегодные эксплуатационные расходы на 8%. Увеличение генерируемой мощности позволит нарастить объем производства сжиженного газа в районе на 9%. При этом сокращение выбросов углекислого газа в Ираке сократится на 81 000 т³/год [3].

Для наглядности, каждый квадратный метр зеркал *CSP* позволит избежать 405 т выбросов CO_2 в атмосферу, что эквивалентно отказу от работы 16 473 автомобилей. Зная, что Ирак подписал Соглашение об изменении климата (Париж, 2015г.), страна может торговать этим углеродным кредитом с другими промышленно развитыми странами. На примере электростанции в Аль-Анбар для рассматриваемой солнечной генерации 50 МВт, потенциальный объем торговли углеродным кредитом выброса CO_2 по цене 40 \$/т, позволит сократить срок окупаемости строительства гибридной электростанции на 3 241

200 \$/год [3].

Специалисты министерства энергетики Ирака считают, что внедрение в тепло-электрическую схему существующих электростанций устройств преобразования солнечной энергии позволит существенно снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии, увеличить объем генерируемой мощности, оперативно решить вопросы дефицита энергии, и, как следствие увеличить объем прибыли, что так важно для восстановления экономики Ирака [8].

Материалы и методы

Схема парогазового цикла, анализируемая в настоящем исследовании, представлена на рис. 1.

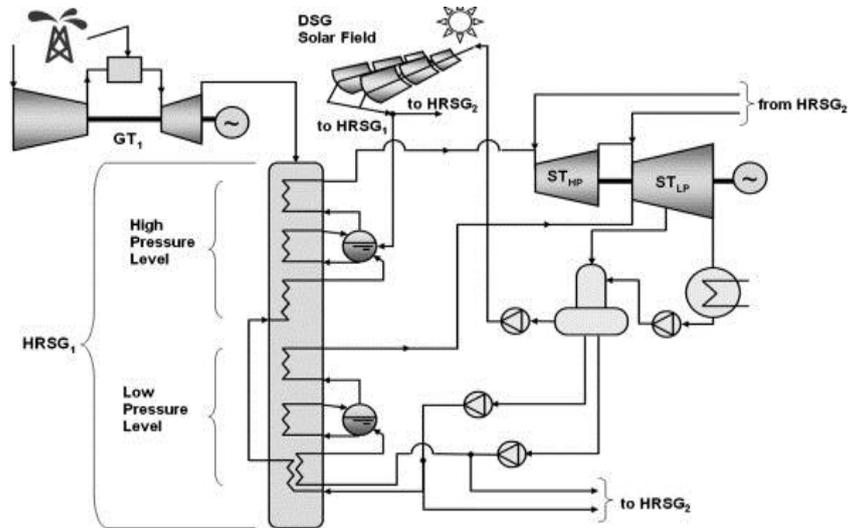


Рис. 1. Схема включения солнечных коллекторов в парогазовый цикл электростанции и пример внешнего вида ГТУ с полем солнечных коллекторов

В качестве прототипа принята 200 МВт ГТУ города Басра. Схема дополнена двумя паровыми турбинами (ПТУ) мощностью 75 МВт (с высоким давлением – *STHP*) и 65 МВт (с низким давлением – *STLP*). ПТУ с рекуперацией тепла *HRSG* работает совместно с солнечными коллекторами ПТС, которые могут генерировать пар напрямую (*DSG – Direct Steam Generation*) или осуществлять тепловой цикл через теплообменник с рабочим телом НТФ из расплава соли или термостойкого масла.

Характеристики солнечных коллекторов ПТС в нашем исследовании приняты с учетом исследований [9].

Концептуальные схемно-технические решения приняты на основании работы [10]. Электростанция работает по комбинированному циклу, где горячие выхлопные газы из ГТУ используются для генерации пара в *HRSG* и последующего привода ПТУ. Дополнительное количество пара генерируется в солнечном парогенераторе *DSG* и также подается в *HRSG*.

Таким образом, часть рабочего тела нагревается в *DSG*, а затем весь объем перегревается выхлопными газами газовой турбины в *HRSG*, где преобразуется экономайзером (*High Pressure Level, Low Pressure Level*) в насыщенный пар [11].

Ночью электростанция работает без *DSG*, так как накопление тепловой энергии экономически не выгодно для данной схемы.

Уравнения баланса энергии для парогазового цикла написаны и решены с использованием программного обеспечения *Engineering equation solver software (EES)*. Решение реализовано на базе итеративного подхода. Уравнения, используемые для анализа ГТУ и ПТУ приняты из исследовательской работы [12].

Полезный прирост тепловой мощности от использования *DSG* определяется по методике, приведенной в источнике [13].

Основу модели составляют следующие математические зависимости:

$$Q_a = F_R \cdot (A_a \cdot DNI \cdot \cos(\theta) \cdot \eta_{optical} \cdot K_\theta - A_r \cdot U_{abs} \cdot (T_r - T_a))$$

$$K_\theta = 1 - 6,74e(-5) \cdot \theta^2 + 1,64e(-6) \cdot \theta^3 - 2,51e(-8) \cdot \theta^4$$

$$DNI = I \cdot \cos(\theta_z)$$

$$W_{ISCC} = W_{gt} + W_{T1} + W_{T2}$$

$$\eta_{ISCC} = W_{ISCC} / E_{in}$$

$$F_{solar} = W_{solar} / W_{ISCC}$$

Для Ирака характерны очень высокие температуры в летние месяцы (до +52° С) и умеренные – зимой, зафиксированная абсолютная минимальная температура в январе составляла +4° С. Скорость ветра ниже средней и колеблется от 2,5 м/с в декабре-январе до 4,1 м/с в июле. Ирак расположен недалеко от экватора. Периоды ясного времени в году колеблются от 2800 до 3300 часов в год. В ходе моделирования использовались статистические данные солнечной радиации в районе между Басрой и Нассрией за 2017 год, а также опыт предыдущих исследований [2, 14, 15] (табл. 1).

Таблица 1

Солнечная радиация, кВтч/м²

| Широта | Долгота | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Среднее |
|--------|---------|--------|---------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|---------|
| 30,25 | 46,25 | 3,54 | 4,42 | 5,22 | 6,02 | 6,99 | 8,97 | 7,93 | 7,07 | 6,36 | 5,04 | 3,52 | 3,29 | 5,57 |
| 30,25 | 47,25 | 3,44 | 4,12 | 5,06 | 5,86 | 6,96 | 8,91 | 7,97 | 7,00 | 6,31 | 4,99 | 3,52 | 3,21 | 5,47 |
| 30,25 | 48,25 | 3,27 | 4,16 | 5,02 | 5,67 | 6,95 | 8,87 | 7,98 | 6,90 | 6,28 | 4,98 | 3,52 | 3,14 | 5,41 |
| 31,25 | 46,75 | 3,18 | 4,24 | 5,05 | 5,67 | 6,74 | 8,87 | 7,91 | 6,94 | 6,19 | 4,83 | 3,22 | 3,03 | 5,35 |
| 31,25 | 47,25 | 3,13 | 4,13 | 5,06 | 5,61 | 6,90 | 8,82 | 7,90 | 6,87 | 6,16 | 4,85 | 3,31 | 3,01 | 5,33 |
| 31,25 | 48,25 | 3,14 | 4,14 | 5,09 | 5,68 | 7,01 | 8,94 | 7,97 | 6,63 | 6,19 | 4,94 | 3,41 | 3,09 | 5,37 |

Результаты

Для город Басра выполнена климатическая выборка для марта, июня, сентября и декабря. На рис. 2 представлена прямая нормальная инсоляция (*DNI*), которая была наиболее высокой в полдень в июне (более 800 Вт/м²) и наименьшей в декабре (около 400 Вт/м²).

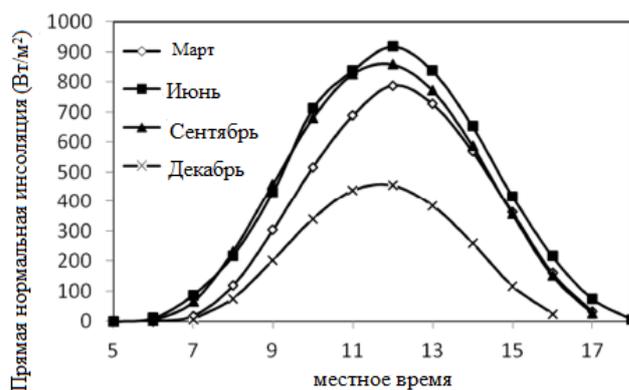


Рис. 2. Прямая нормальная инсоляция

Ожидаемая производительность солнечной станции приведена на рис. 3. Мощность, генерируемая солнечными коллекторами, указана на вертикальной оси графика. Как видно генерируемая мощность в июне выше, чем в декабре, что связано с низким *DNI* зимой.

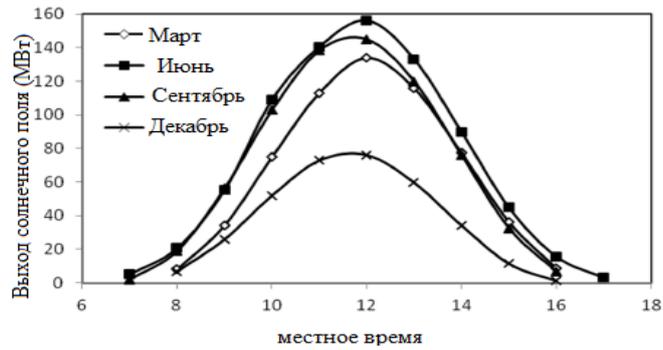


Рис. 3. Эффективность солнечной станции

Результат интегрального энергетического анализа предлагаемых установок, представлен на рис. 4.

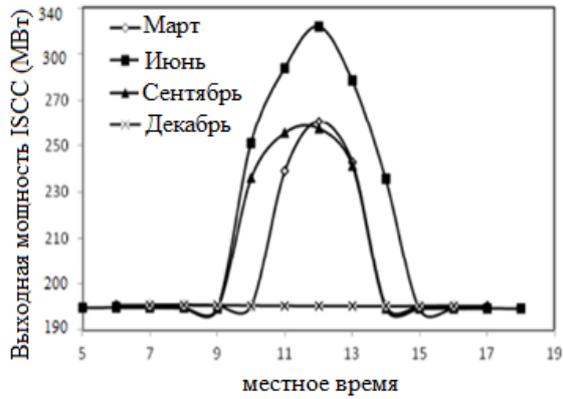


Рис. 4. Эффективность ISCC

Пик вырабатываемой мощности приходится на период с 9 до 15 часов, что совпадает с пиком потребления. Как видно из графика, наброс мощности ISCC отсутствует в декабре из-за низкой интенсивности солнечной инсоляции. Расчеты показывают, что ISCC может вырабатывать до 330 МВт в июне, что приведет к улучшению комбинированного цикла от 38 до 55%, как показано на рис. 5.

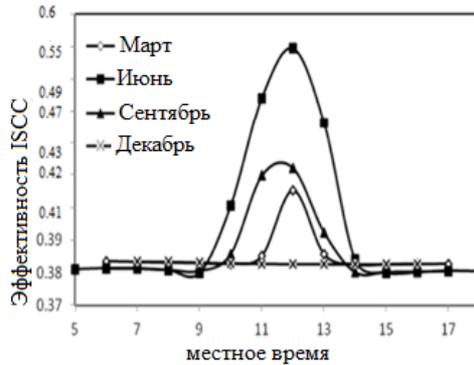


Рис.5. Эффективность ISCC

Процент мощности, производимой за счет преобразования солнечной энергии (названной солнечной фракцией) представлен на рис. 6. Как было показано на рис. 3, уровень солнечной энергии в декабре низкий. Поэтому кривая за декабрь не представлена на рис. 6. В полдень в июне месяце солнечная фракция может составлять 25% (при DNI не менее 800 Вт/м^2), что технико-экономически является приемлемым результатом.

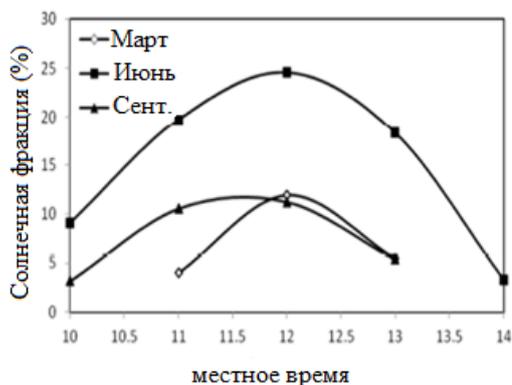


Рис. 6. Солнечная фракция

На рис. 7 представлено сравнение эффективности электростанций на базе технологии *ISCC* и типичных ГТУ. Энергия солнечной станции используется для снижения себестоимости электроэнергии. При увеличении числа солнечных коллекторов с 450 до 600 доля солнечной энергии увеличивается с 24% до $\approx 40\%$.

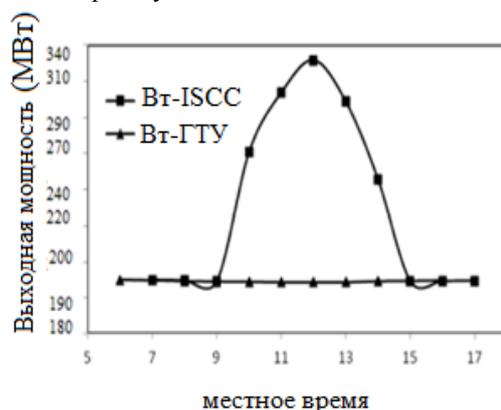


Рис. 7. Сравнение мощности ISCC и ГТУ

Обсуждение

Главная задача энергетики Ирака – это получение максимально возможной прибыли, которая пойдет на восстановление и развитие инфраструктуры. Для достижения цели необходимы радикальные решения [16]. Сегодня это переход на новые схемы – *ISCCS*.

Модель *ISCCS* с *PTC* в Алжире показывает, что максимальный КПД гибридных электростанций следует ожидать при соблюдении условий – высокий *DNI*, низкая скорость ветра, наличие воды и природного газа. Максимальная генерация солнечной энергии ожидается в июне, до 18% [17].

Результаты моделирования *ISCC* в ОАЭ показывают, что общая эффективность станции увеличивается с 52,4 до 61,8%, т.е. на 9,4% [5].

Для сравнения, эффективность гибридной схемы *ISCC* электростанции *Beharetal* в Алжире мощностью 150 МВт составляет 67%, при вкладе солнечной генерации 15% [3].

Переход с *PTC* на централизованную приемную систему – *CRS* может увеличить общий КПД электростанции еще на $\approx 3\%$ [7].

Схема *ISCCS* с *PTC*, в зависимости от доли затрат, позволяет снизить себестоимость энергии примерно на 20%. Ожидаемая эффективность технологии *CSP* в районах Ирака – *Naenawa*, *Al-Anbar*, *Kerbalaa*, *Al-Najaf*, *Diwaniyah*, *Al-Basrah* должна составить не менее 11,3% от общей выработки электроэнергии (около 145 854 МВт в год) [3]. При детальной проработке проектных решений рост мощности гибридных электростанций может составить 13% [18,19].

КПД существующей в Басра газотурбинной электростанции составляет $\approx 38\%$. Модель электростанции с дополнительным циклом *ISCC-DSG* (выполненная авторами) показала рост КПД с 38% до 55%, т.е. на 17%, что сопоставимо с результатами других исследователей.

К недостаткам перехода на гибридную схему следует отнести зависимость от солнечной инсоляции, т.е. фактический простой в зимние месяцы. Экономический анализ

показывает, что расходы на капитальное строительство концентратора солнечной энергии – CSP выше, чем только турбины CCGT. На CSP приходится 67% от общего объема капитальных вложений, но зато эксплуатационные расходы CSP составляют всего около 5% от общей стоимости электростанции ISCCS, т.е. 34 \$/кВт для CSP и 164 \$/кВт для CCGT соответственно [3].

За планируемый срок эксплуатации электростанции г. Басра – 30 лет модернизированная станция позволит сэкономить топлива на ≈ 46 млн. долларов, и при этом существенно снизятся объемы выбросов CO₂. Углеродный кредит позволит значительно сократить срок окупаемости модернизации.

Авторы планируют дополнить математическую модель переходом с РТС (*parabolic trough collector*) на централизованную приемную систему – CRS (*central receiver system*) с комбинированным циклом – CC (*combined cycle*). Новые расчеты должны показать перспективы строительства гибридной станции с солнечной башней CRS.

Заключение

Ирак обладает высоким потенциалом для развития солнечной энергетики. Моделирование парогазового цикла ГТУ, дополненного РТС показало следующие результаты:

- основными факторами, влияющими на производительность электростанции, являются: вид топлива, температура окружающей среды, температура теплоносителя на входе в турбину, объем подводимого тепла, генерируемого солнцем;
- мощность электростанции в г. Басра можно увеличить до 330 МВт при существующей ГТУ 200 МВт;
- КПД электростанции в г. Басра может быть увеличено до 55% (от 38% сегодня), т.е. при работе в течение года выдаваемая генерируемая мощность увеличится на 20-80% по сравнению с существующей схемой на базе ГТУ;
- основными преимуществами схемы ISCCS являются экономия топлива, снижение спроса на электроэнергию в пиковый период, а также сокращение выбросов углерода;
- ожидаемая годовая экономия топлива в пересчете на баррель нефтяного эквивалента составляет около 115 350 бнэ/год;
- сокращение выбросов углерода CO₂ составит около 170 672 т/год;
- потенциальный объем торговли углеродным кредитом выброса CO₂ позволит значительно сократить срок окупаемости строительства модернизации ГТУ по схеме ISCCS.

Литература

1. Reda M., Saied N., Khaldi A., et al. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition; Atlanta, GA; 2006. pp. 1792-1795.
2. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq // Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET); Honolulu, HI; 2018. pp. 1-16.
3. Khalidah A J., Al-Qayim. Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq // Materials Science and Engineering, V.518, Electric and Electronic Engineering; Published under licence by IOP Publishing Ltd.
4. Boumedjirek M., Merabet A., Feidt M., Meriche I.E. Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria. // International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Tangier; 2017. pp. 1-8.
5. Talukder P., Soori P. K., Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates // International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE); Offenburg. 2015. pp. 62-69.
6. Li C.-J., Li P., Wang K., Molina E. Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. AIMS Energy 2(2). 2014. pp. 133-157.
7. Amani M., Ghenaiet A., Smaili A. Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle // 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6.
8. Ministry of electricity Iraq Available at: <https://www.moelc.gov.iq/>. Accessed to: 12 February 2020
9. Darwish M.A. On the use of integrated solar-combined cycle with desalting units in Qatar 2015, 53 (4). pp. 855-875.
10. Nezammahalleh H., Farhadi F., Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic

assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. *Solar energy*. 2010. 84(9). pp. 1696-1705.

11. Zachary J. *Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems // Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation*; Book; Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. N. 32. pp. 283-305.

12. Baghernejad A., Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203.

13. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*. 2004. 29 (5-6). pp. 947-959.

14. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>. Accessed to: 12 February 2020

15. Burgermeister J. Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy URL: Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-help-rebuild-itseconomy>. Accessed to: 12 February 2020

16. Al-Waeely A.A., Salman S.D., Abdol-Reza W.K., et al. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014, V.14, N. 2, pp. 16-23.

17. Abdelhafidi N., Bachari N., Abdelhafidi Z., Cheknane A., Mokhnache A. Castro L. Modeling of integrated solar combined cycle power plant (ISCC) of HassiR'mel, Algeria. *International Journal of Energy Sector Management*. 2019.

18. Leo J., Davelaar F., Besançon G., Voda A., Girard A. Coordinated control for an Integrated Solar Combined Cycle. *European Control Conference (ECC)*; Linz. 2015. pp. 2414-2419.

19. Ahmed Z. Abass, D.A. Pavlyuchenko. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. V. 9, N. 6, pp. 4617-4624.

Авторы публикации

Ахмед Зекар Абасс – аспирант, «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Дмитрий Анатольевич Павлюченко – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой систем электроснабжения предприятий, «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Артем Михайлович Балабанов – студент, «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Виталий Максимович Лесс – студент, «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

References

1. Reda M., Saied N., Khaldi A., Abdul-Hussain M. a., Ekwue A. Iraq electrical power infrastructure - past, present and future developments and expectations. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*; Atlanta, GA; 2006. pp. 1792-1795. doi: 10.1109/PSCE.2006.296184.

2. Alibage A. Assessing photovoltaic solar technologies as a solution for the problem of power shortage in Iraq. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*; Honolulu, HI; 2018. pp. 1-16. doi: 10.23919/PICMET.2018.8481984.

3. Khalidah A J Al-Qayim *Integrated solar thermal combined cycle for power generation in Iraq Materials Science and Engineering*, V. 518, Electric and Electronic Engineering; Published under licence by IOP Publishing Ltd. doi: 10.1088/1757-899X/518/4/042002.

4. Boumedjirek M., Merabet A., Feidt M., Meriche I.E. Performance evaluation of parabolic trough power plants on direct steam generation and integrated solar combined cycle system in Algeria. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*; Tangier; 2017. pp. 1-8. doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477315.

5. Talukder P., Soori P. K., Integration of parabolic trough collectors with natural gas Combined Cycle power plants in United Arab Emirates. *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*; Offenburg. 2015. pp. 62-69. doi: 10.1109/ICSGCE.2015.7454270.

6. Li C.-J., Li P., Wang K., Molina E. Survey of properties of key single and mixture halide salts

for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems. *AIMS Energy* 2(2). 2014. pp. 133-157. doi: 10.3934/energy.2014.2.133

7. Amani M., Ghenaiet A., Smaili A. Determination of the performance of a solar tower integrated with a Combined Cycle. *6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*; Rabat, Morocco. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8703000

8. *Ministry of electricity Iraq* Available at: <https://www.moelc.gov.iq/>. Accessed: 12 February 2020.

9. Darwish M.A. On the use of integrated solar-combined cycle with desalting units in Qatar. *Desalination Water Treat.* 2015, 53 (4). pp. 855-875. doi: 10.1080/19443994.2014.994264].

10. Nezammahalleh H., Farhadi F., Tanhaemami M. Conceptual design and techno-economic assessment of integrated solar combined cycle system with DSG technology. *Solar energy*. 2010. 84(9). pp. 1696-1705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.007>.

11. Zachary J. Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) Systems. *Combined Cycle Systems for Near-zero Emission Power Generation; Book; Woodhead Publishing Series in Energy*. 2012. N. 32. pp. 283-305. doi: 10.1016/B978-0-85709-013-3.50010-9.

12. Baghernejad A., Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011. 52 (5). pp. 2193-2203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>.

13. Dersch J. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*. 2004. 29(5-6). pp. 947-959. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(05\)80188-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(05)80188-2).

14. *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>. Accessed to: 12 February 2020.

15. Burgermeister J. *Iraq looks to solar energy to help rebuild its economy* URL: Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/03/iraq-looks-to-solar-energy-to-hel-rebuild-itseconomy>. Accessed to: 12 February 2020.

16. Al-Waeely A.A., Salman S.D., Abdol-Reza W.K., Chaichan M.T., Kazem H. A. Al-Jibori H. S. Evaluation of the spatial distribution of shared electrical generators and their environmental effects at Al-Sader City-Baghdad-Iraq. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014, V.14, N. 2, pp. 16-23. doi: 10.24842/1611/0022/.

17. Abdelhafidi N., Bachari N., Abdelhafidi Z., Cheknane A., Mokhnache A. Castro L. Modeling of integrated solar combined cycle power plant (ISCC) of HassiR'mel, Algeria. *International Journal of Energy Sector Management*. 2019. doi: 10.1108/IJESM-08-2018-0013.

18. Leo J., Davelaar F., Besançon G., Voda A., Girard A. Coordinated control for an Integrated Solar Combined Cycle. *European Control Conference (ECC)*; Linz. 2015. pp. 2414-2419. doi: 10.1109/ECC.2015.7330900.

19. Ahmed Z. Abass, D. A. Pavlyuchenko. The exploitation of western and southern deserts in Iraq for the production of solar energy. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2019. V.9. N. 6. pp. 4617-4624. doi: 10.11591/ijece.v9i6.pp4617-462.

Authors of the publication

Ahmed Zkear Abass – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: theking.amir@mail.ru.

Dmitryi A Pavlyuchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: pavlyuchenko@corp.nstu.ru.

Artem M. Balabanov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: balabanov_a_m@mail.ru.

Vitaliy M. Less – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
Email: lessv134@gmail.com.

Поступила в редакцию

22.02.2020г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И



УДК 665:539.143.43

DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-2-108-116

СТЕНД ПМР-АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ И СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ПМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ

Нгуен Тъи Киен¹, Р.С. Кашаев²

Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия

ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-5679-5442>, nckien@cnd.edu.vn

Резюме: В статье описывается стенд для изучения системы поточного анализатора на основе протонного магнитного резонанса (ПМР), употребляемого для оперативного управления протон содержащих смесей на вязкость и состав концентрации асфальтенов и смол (АС) при нефтедобыче, нефтеподготовке и использовании на объектах энергетики при анализе жидкого топлива.

В данной статье также рассматривается оборудование, которое используется для управления параметрами нефти методом ПМР-Релаксометрии. Особое внимание обращается на изучение физико-химических свойств компонентов нефтей с использованием ПМР. Использование оборудования для пробоотбора с задачей поточного экспресс-управления параметрами нефти методом ПМР-релаксометрии даст возможность устранить расслоение фаз в пробоотборнике (конический расширитель) и влияния на измерение неполного заполнения трубки, обеспечить интенсификацию гомогенизацию потока жидкости в коническом расширителе, а также автоматизацию процесса измерения.

Ключевые слова: ПМР-анализатора (ПМРА); вязкость; многокомпонентные жидкости; концентрации асфальтенов и смол(АС); нефть; стенд.

Благодарности: Авторы благодарны кафедре Приборостроения и мехатроники Казанского государственного энергетического университета за поддержку в создании оборудования.

Для цитирования: Нгуен Тъи Киен, Кашаев Р.С. Стенд ПМР-анализатора для измерения вязкости и состава многокомпонентных жидкостей методом ПМР-релаксометрии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 108-116. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-108-116.

TESTING STAND OF PMR ANALYZER FOR MEASURING VISCOSITY AND COMPOSITION OF MULTICOMPONENT LIQUIDS BY PMR RELAXOMETRY METHOD

Nguyen Chi Kien¹, R.S. Kashaev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nckien@cnd.edu.vn

ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-5679-5442>, nckien@cnd.edu.vn

Abstract: The article describes a bench for studying a system of a flow analyzer based on nuclear (proton) magnetic resonance (PMRA), used for the operational control of proton-containing

multicomponent liquids (oils, fuels, oil and chemical products) and mixtures for viscosity and composition (concentration of asphaltenes and resins) during oil production, oil preparation and use at energy facilities in the analysis of liquid fuel.

This article also looks at the equipment that is used to control oil parameters with PMR-Relaxometry. Particular attention should be paid to the analysis of physical and chemical properties of oil components with the use of PMR. The use of sampling equipment for the purpose of controlling the rapid flow of oil parameters by the PMR method will eliminate phase separation in the sampling device and eliminate clogging with waste sediments, ensure efficient homogenization of the fluid flow in the sampler, as well as automate the measurement process.

Key words: *PMR analyzer (PMRA); viscosity; multicomponent liquids; concentrations of asphaltenes and resins (AR); oil; laboratory pedestal.*

Acknowledgments: *The authors are grateful to the Department of Instrument Engineering and Mechatronics of Kazan State Power Engineering University for supporting research equipment.*

For citation: Nguyen Chi Kien, Kashaev RS. Testing stand of PMR analyzer for measuring viscosity and composition of multicomponent liquids by PMR relaxometry method // *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):108-116. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-108-116.

Введение

Современный этап нефтедобычи характеризуется возрастанием доли тяжелых нефтей с высокой концентрацией асфальтенов, смол (АС), вязкость нефти может достигать 1000 мПа·с, и проблема ее контроля для ее подготовки и транспортировки, является актуальной для снижения затрат. Снижение АС для предотвращения асфальто-смолисто-парафиновых отложений также одно из приоритетных направлений нефтедобычи. Важно повысить точность измерений – ежегодные потери в стране из-за погрешностей измерений составляет \$1,5 млрд. Поточный экспресс-контроль требует создания интегрированных аппаратно-технологических комплексов, обеспечивающих такие функции, как непрерывный пробоотбор с автоматическим экспресс-анализом. Но, к сожалению, в РФ не существует нормативной документации по применению поточных приборов и анализаторов, аналогичных зарубежным API 551, 555.

Для реализации поточного контроля параметров скважинной жидкости (СКЖ) по ГОСТ 8.615-2005 требуется целая номенклатура анализаторов. Как правило, производителями серийных анализаторов являются зарубежные фирмы, что сопряжено с безопасностью приборного оснащения отечественной нефтедобычи – есть случаи отключения ее с сигналов со спутника[1-2]. Время анализа анализаторов довольно длительно, что затрудняет синхронизацию вывода результатов на диспетчерский пульт. Вследствие разности применяемых в них физических методов и программного обеспечения, процесс контроля сложен и недоступен развитию.

Близким к разрабатываемому нами проточному ПМР-анализатору (ПМРА) является анализатор КОУН на базе спектрометра ЯМР высокого разрешения (по спектрам ЯМР) [3-4]. Имеется его малогабаритный вариант. Однако, его характеристики не позволяют использовать его непосредственно у скважин и в парках подготовки нефти. Кроме того, диаметр проточных патрубков малогабаритных КОУН мал, что вызвано необходимостью высокой однородности магнитного поля $\sim 10^{-7}$, что требует малого диаметра датчика при магните большой массы. В трубке такого диаметра будут образовываться асфальто-смолисто-парафиновые отложения.

Материалы и методы

Автоматизация контроля экспресс-анализа физико-химических свойств углеводородного сырья (УВС), в частности, вязкости, АС [5] являются важными для нашей страны с разбросанностью месторождений на огромной территории и протяженной трубопроводной системой.

Республика Татарстан обладает большими залежами высоковязкой нефти, занимающими все больший объем добываемого сырья, вязкость которого достигает 1000 мПа·с. Снижение влияния АС на качество сырья и предотвращения асфальто-смолисто-парафиновых отложений в трубопроводах также весьма важна. Проблема как

можно более раннего контроля этих параметров является актуальной и одним из приоритетных направлений техники контроля СКЖ [3].

Уникальными возможностями контроля обладает метод импульсного ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), в частности метод протонной магнитно-резонансной релаксометрии (ПМРР), позволяющий без подготовки пробы в автоматическом режиме в лабораторных условиях и в режиме *on-line* на потоке проводить экспресс-анализ СКЖ и СН, замещая ряд приборов, требуемых для контроля СКЖ по ГОСТ 8.615-2005.

В данной статье описана разработанная система представительного пробоотбора в составе ПМРА имеющая цель устранения из потока СКЖ твердых примесей, совершенствование перемещения патрубков, оптимизацию корпуса, уменьшения габаритов магнита ПМРА. Конструкция ПМРА с системой пробоотбора с управлением от микроконтроллера *ATMEGA 8515L* представлена на рис.1.

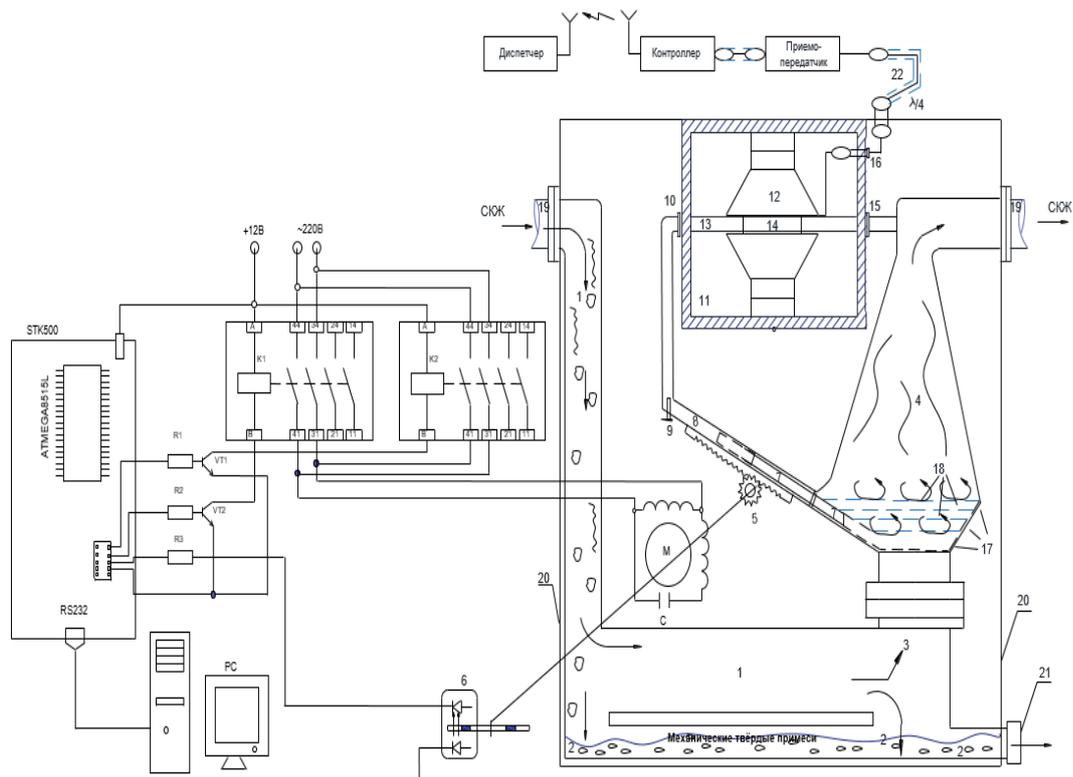


Рис.1. Электромеханическая и кинематическая схема проточного ПМР-анализатора

На рис.1 представлен такой ПМР-анализатор [5,6], способный в автоматическом режиме проводить указанные измерения. На рис.1. цифрами обозначены: 1 - измерительная труба; 2 - полость механических твёрдых примесей; 3 – сетка; 4 - пробоотборник (конический расширитель); 5 – шестерня; 6 - свето-фотодиод; 7 – патрубок; 8 – трубка; 9 – термоэлемент; 10 – фланец; 11 –ПМР-релаксометр; 12 - магнита полюсный наконечник; 13 - трубка диамагнитная; 14 - индуктивности катушка; 15 – фланец; 16 – разъем; 17 -датчики тензометрические; 18 - зубчатые кольца; 19 - магистральная труба; 20 – корпус; 21 - патрубок сброса механических твёрдых примесей; 22 – кабель.

Поток жидкости, попадая в коническом расширитель 4, уменьшает скорость v и повышает давление P в степени, пропорциональной \sqrt{S} , где S - сечение 4. В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, которая гомогенизируется и через входной патрубок поступает со скоростью v_i , (определяемой положением патрубка), в датчик 14 магнита ПМР- анализатора и выходит через выходной патрубок 15, который может быть установлен в любом положении трубы. В результате, скорость потока будет определяться разницей давлений в сечении конического расширителя. При положении патрубка, когда разница давлений равна нулю, независимо от скорости и давления в магистральной трубе скорость потока в датчике ПМР также минимальна, и измерение ПМР-параметров осуществляется «в остановленном потоке»[6,7]. Расширение 4 измерительной трубы 1 размещается вертикально для устранения расслоения фаз в пробоотборнике (конический

расширитель) и влияния на измерение неполного заполнения трубки 8, идущей в датчик ПМР. Перед входом в конический расширитель располагается сетка 3, защищающая от мехпримесей. Положение патрубка при управлении от МК фиксируется гребенкой с шестерней 5, синхронизированной со свето-фото диодным обтюратором 6, отсчитывающим число оборотов шестерни.

Температура потока в трубке 8 измеряется термоэлементом 9. Далее поток через фланцы 10 поступает в зазор полюсных наконечников 12 магнита 11 ПМР-релаксометра по диамагнитной трубке 13 с катушкой индуктивности 14, по сигналу с которой определяются времена спин-спиновой релаксации T_2 , по которым в ЭВМ (Ноутбук) рассчитываются вязкости η и АС в СКЖ. Сигнал ПМР с катушки индуктивности 14 поступает на 16 разъем и по кабелю 22 идёт в приемо-передатчик релаксометра ПМР, затем на контроллер и далее по каналу на диспетчерский пункт. Все устройство помещено в корпус 20 с патрубком 21 для сброса осевших в емкости 2 механических примесей.

Микроконтроллер *ATmega 8515* имеет производительность 1 миллион операций в секунду. Имеет AVR ядро с 32 регистрами, подключенными к арифметико-логическое устройству. Поддерживается Си-компилятором, макроассемблером. Для питания тактового генератора на плате *STK500* имеется источник питания на 15 В с преобразователем *DR-4515* от ~220 В. Для инициализации управления положением патрубка 7 по ПМР-данным СКЖ, компьютер выбирает из базы данных положение патрубка, соответствующее максимальной крутизне зависимости $(T_{2\text{эфф}})^{-1}$ от скорости v_i . Затем с Ноутбука вызывается программа управления электроприводом патрубка. Ожидается появление команда «Пуск» для загрузки в программу измерения.

Для поточного контроля в скважинной жидкости (СКЖ) и водо-нефтяных эмульсиях (ВНЭ) таких важных параметров нефти, как вязкость и концентрация асфальтенов и смол, нами предлагается способ измерения с использованием метода ПМР-релаксометрии. Способ заключается в отборе пробы из потока жидкости в трубопроводе, облучении образца в датчике релаксометра ПМР в составе ПМРА.

Для получения зависимостей вязкости η от скорости релаксации $(T_{2\text{эфф}})^{-1}$ использовался 21 вид нефти Поволжья (рис.2). Погрешности измерений составили $\delta_{\text{отн}} = S \cdot 100\% / 64 (\text{мПа}\cdot\text{с}) = \pm 3,1\%$. По результатам исследования экспресс-методов ПМР определения вязкости и асфальтенов в нефтях [8-10], из зависимостей динамических вязкостей η ($R_{1,2A}$) от скоростей релаксации $R_{1,2A} = (T_{1,2H})^{-1}$, представленных на рис.2 и описываемых с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,99$ со стандартными отклонениями $S = 1,55-2,3$ с учетом связи $v = \eta/\rho$ уравнениями (1) и (2) определяются значения вязкости v нефтяной компоненты СКЖ или ВНЭ [7,11-12].

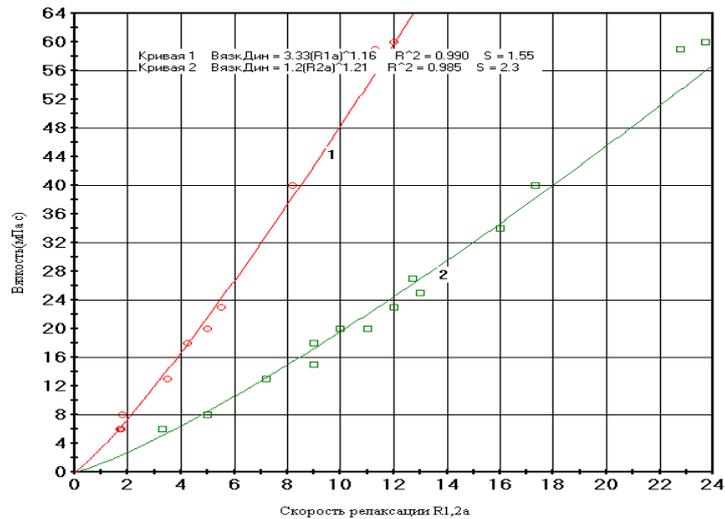


Рис.2. Зависимости динамических вязкостей $\eta = v\rho$ от скоростей релаксации $\eta(R_{1A})$ – кривая 1, $\eta(R_{2A})$ – кривая 2

$$v = \frac{3,33}{\rho} R_{1A}^{1,16} \quad (1)$$

$$v = \frac{1,2}{\rho} R_{2A}^{1,21} \quad (2)$$

Для получения зависимостей Асфальтенов (%) от времен релаксации $T_{1,2}$ использовались 26 видов нефти Поволжья и месторождения *Васн-Но* (Вьетнам) (рис.3.) Зависимости концентраций $A_{сф}$ для видов нефти Поволжья и Зап.Сибири, (кривые 1,2) и видов нефти Васн, но от времен T_{2A} (кривая 3), а также для сравнения зависимости $A_{сф}$ от T_{2A} представлены на рис.3.

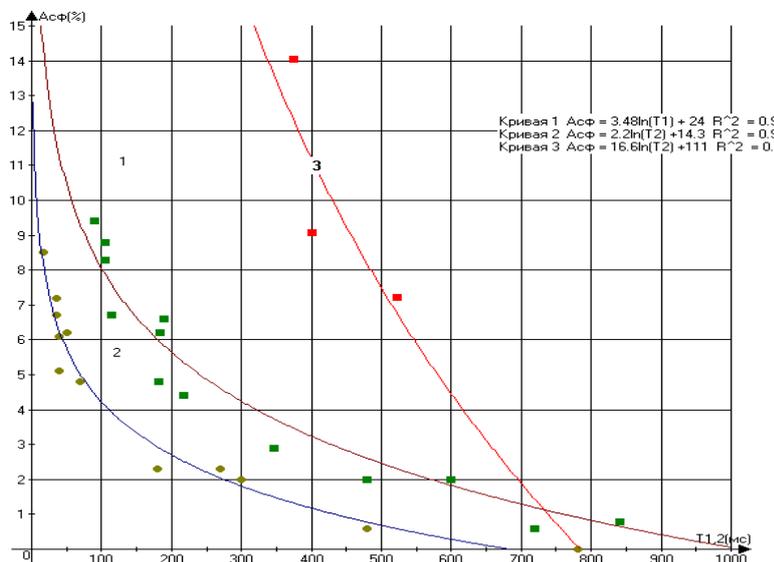


Рис.3. Зависимости концентраций $A_{сф}$ от измеренных времен $T_{1,2A}$ (кривые 1 и 2) для видов нефти Поволжья и Западной Сибири и T_{2A} для вьетнамских видов нефти *Васн-Но*

Они с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,956$ и $S = 0,7$ описываются уравнениями:

$$A_{сф} = 3,48 \ln(T_{1A}) + 24 \quad (3)$$

$$A_{сф} = 2.2 \ln(T_{2A}) + 14,3 \quad (4)$$

$$A_{сф} + C_{мол} = 16,6 \ln(T_{2A}) + 111 \quad (5)$$

Здесь уравнения (3,4) относятся к отечественным видам нефти Поволжья, уравнение (5) – к видам нефти *Васн Но* (Вьетнам).

Результаты и обсуждение

Испытания системы пробоотбора проводились на стенде путем определения точности измерения скорости потока V водо-нефтяных эмульсий, прокачиваемых насосом через макет-стенд ПМР-анализатора, поскольку скорость можно точно определить по формуле $V = Q/S$ зная производительность насоса (расход) Q и сечение трубки S . Испытания проводились в образцах чистой воды, 90%, 80%, 55% и 20%-й эмульсии.

Для измерения скорости потока и расхода входной патрубков располагается в таком положении сечения расширения трубы, которое обеспечивает диапазон скоростей потока, для которого ранее экспериментально была получена зависимость значений $T_{2эфф}$ эффективной скорости релаксации от скорости потока V (м/с) или расхода Q (л/час):

$$(T_{2эфф})^{-1} = (T_{2o})^{-1} + (\tau)^{-1}, \quad (6)$$

где $T_{2эфф}$ – измеряемое время спин-спиновой релаксации водо-газо-нефтяной смеси потока, T_{2o} – время спин-спиновой релаксации неподвижной жидкости, τ – время пребывания жидкости в объеме катушки датчика.

Скорость потока V определяются по формулам:

$$V = K_c S [(T_{2o})^{-1} + (\tau)^{-1}] / K S_D \quad (7)$$

Скорости потока V_i отдельных компонент СКЖ определяют по формуле:

$$Q_i = Q \cdot A_{oi} / \sum A_{oi} \quad (8)$$

где $A_{oi}/\sum A_{oi}$ концентрация i -й компоненты смеси, определяемой из огибающих эхо в методике КПМГ. Макет-стенд ПМР-анализатора реализован в датчике с трубкой $\varnothing 30$ мм в зазоре магнита портативного релаксометра ПМР-*NP2* [7,11-13].

Результаты измерений зависимостей скоростей релаксации $(T_{2эфф})^{-1}$ от скорости V потока в образцах чистой воды, 90%, 80%, 55% и 20%-й эмульсии приведены на рис.4. Скорость потока V определялась и регулировалась производительностью жидкофазного насоса. Обратная зависимость $V(T_{2эфф})$ от времен релаксации $T_{2эфф}$, удобная для ввода в базу данных Ноутбука и для наглядных оценок, приведена на рис.5

Полученные данные обрабатывались в *AdvancedGrafer*. Из рис.5 видно, что все кривые зависимости имеют излом при $V=0,2$ м/сек и с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,956-0,999$ со среднеквадратическими отклонениями $S \approx 0,04$ описываются уравнениями:

$$1a \quad V(\text{м/с}) = 6,22 \exp(-3,2 \cdot T_2), \text{ для 90\%-й эмульсии при } V > 0,2 \text{ м/с} \quad (9)$$

$$1b \quad V(\text{м/с}) = 0,45 / T_2, V < 0,2 \text{ м/с} \quad (10)$$

$$2a \quad V(\text{м/с}) = 6 \exp(-3,7 T_2) \text{ для 75\%-й эмульсии, } V > 0,2 \quad (11)$$

$$2b \quad V(\text{м/с}) = 0,76 / T_2, V < 0,2 \text{ м/с} \quad (12)$$

$$3a \quad V = 2,4 \cdot 10^6 \exp(-13,8 T_2) \text{ для 25\%-й эмульсии, } V > 0,2 \quad (13)$$

$$3b \quad V = 1,77 / T_2 - 1,355 \quad V < 0,2 \quad (14)$$

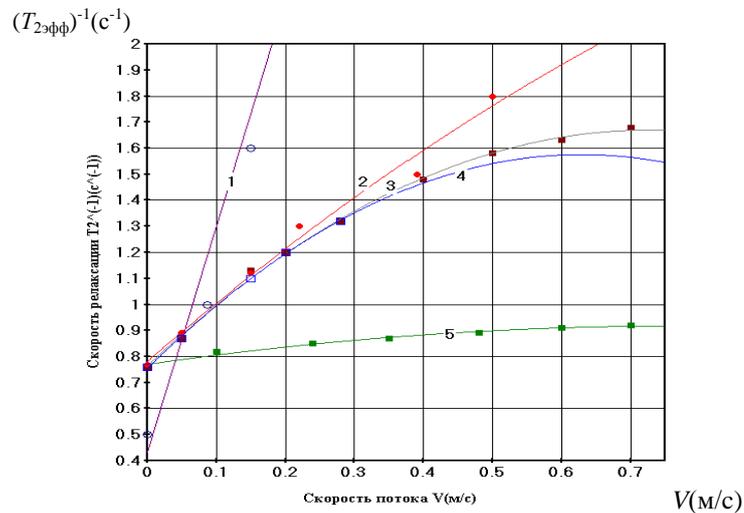


Рис.4. Зависимость скорости спин-спиновой релаксации $T_{2эфф}^{-1}$ для воды (кривая 1), 90%-й (2), 80% (3), 55%-й (4) и 20%-й (5) эмульсий от скорости потока водо-нефтяной эмульсии

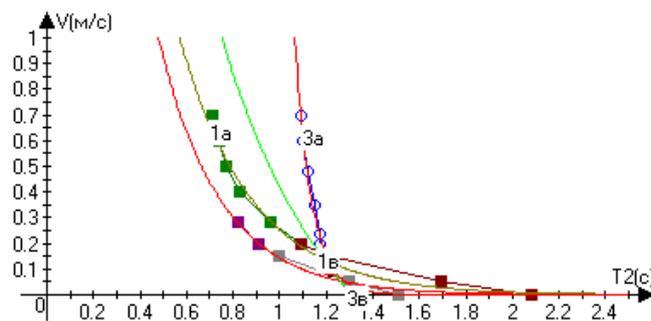


Рис.5. Зависимость скорости потока V от времен эффективной спин-спиновой релаксации T_2 для 90%-й (кривая 1а, в), 75% (кривая 2а, в) и 25%-й (кривая 3а, в) эмульсий. Точки – измерения ПМР-анализатором, сплошные кривые – истинные зависимости скоростей потока от времен релаксации T_2

То есть относительная ошибка измерения составила $\delta_{отн} = S \cdot 100\% / 1(\text{м/с}) = 4\%$.

С целью изучения работы ПМРА при поточном контроле в СКЖ и ВНЭ вязкости и концентрации асфальтенов и смол, нами разработан учебный стенд на рис. 6. На стенде внизу расположен Ноутбук с программой обработки результатов измерений методом ПМР-релаксометрии. Слева на столе – датчик с магнитом, к которому по трубке подводится скважинная жидкость, взятая из потока через патрубок, установленный в коническое расширение вставляемое через фланцы в трубу от скважины или магистральный трубопровод. На стенде – кинематическая схема перемещения патрубка. Справа –

контроллер *Atmega 8515L*, управляющий перемещением патрубков и отбором пробы для анализа в ПМР – анализаторе.



Рис.6. Учебный стенд по изучению ПМР-анализатора

С использованием разработанного ПМРА и портативной автономной аппаратуры, уравнения (1-5) могут быть использованы для экспресс-контроля определения вязкости и асфальтенов в нефти в процессе ее добычи и транспортировки [13-15].

Выводы

1. Для получения зависимостей вязкости η от скорости релаксации $(T_{2эфф})^{-1}$ использовался 21 вид нефти Поволжья. Погрешность измерения составила $\delta_{отн} = S \cdot 100\% / 64(\text{мПа} \cdot \text{с}) = \pm 3.1\%$.

2. Для получения зависимостей Асфальтенов (%) от времен релаксации $T_{1,2}$ использовались 26 видов нефти Поволжья и месторождения *Васн-Ню* (Вьетнам). Погрешность измерений составила $\delta_{отн} = S \cdot 100\% / 15(\%) = \pm 4.7\%$.

3. Результаты испытаний стенда показали, что предложенная система пробоотбора и анализа дает следующие преимущества:

- Магистральная труба может быть любого диаметра;
- В пробоотборнике осуществляется гомогенизация газо-водно-нефтяной смеси без дополнительных смесителей, создающих сопротивление потоку;
- Подача пробы в датчик ПМР-релаксометра производится перепадом давлений, регулируемых положением патрубков в расширителе, при этом не требуются насосы и задвижки, можно остановить поток в датчике ПМР;
- Можно сканировать поток по сечению трубы перемещением патрубков.
- Испытания системы пробоотбора проводились на стенде путем определения точности измерения скорости потока V водо-нефтяных эмульсий и показали, что среднеквадратическая ошибка не превышает 0,04, что соответствует относительной ошибке $\pm 4\%$.

Литература

1. Timothy Mark EP 0 691 526 A1 G01F1/74 “Method and apparatus for the determination of the individual mass flow rates of the multicomponent fluid”, 1998. inventor: Bayer, Alwin D-91171 Greding (DE), representative: Gregory, Timothy Mark Northampton NN1 SEL (GB).
2. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия. 2000. 410с.
3. Кашаев Р.С., Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Козелков О.В. Экспресс-методы протонной магнитно-резонансной релаксометрии // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. №5(86) С.807-812.
4. Кашаев Р.С., А.Н.Темников, Тунг Ч.В., Киен Н.Т., Козелков О.В. Релаксометр протонного магнитного резонанса // Журнал приборы и техника эксперимента. 2019. №2. С.145-148.
5. Кашаев Р.С., Сунцов И.А., Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Усачёв А.Е., Козелков О.В. Экспресс-метод и аппаратура протонного магнитного резонанса // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. №2(86). С.263-268.
6. Киен Н.Т., Тунг Ч.В. Контроль параметров нефти и управления нефтедобычей по данным ПМР анализатора // Материалы докладов 12 Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения». 26 – 28 апреля 2017 г, Казань, КГЭУ. С.280 – 283.
7. Киен Н. Т., Тунг Ч.В., Кашаев Р.С. Электро-аппаратный комплекс для проточного контроля параметров нефти // Сб. статей по материалам Межд. н./пр. конференции. Научные исследования в

современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития, Уфа, Вестник наука, 19 мая 2019 г. Ч. 1, с. К-7-37.

8. Киен Н.Т., Тунг Ч.В., Кашаев Р.С. Определение параметров скважинной жидкости проточным ПМР-Анализатором // Материалы докладов 4 Поволжская научно-практическая конференция. Приборостроение и автоматизированный электропривод и топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве, Казань, ФГБОУ ВО КГЭУ, 6-7 декабря 2018 г. С 147 – 150.

9. Кашаев Р.С., Тунг Ч.В., Киен Н.Т., Козелков О.В. Проточный анализатор нефти на базе протонного магнитного резонансного релаксометра // Сборник научных трудов по материалам 1 Межд. н./пр. конференции, 30 июня 2018 года, г. Смоленск. С.89-90.

10. Киен Н.Т., Тунг Ч.В. Блок приёмника переносного автономного протонного магнитного резонансного релаксометра // Материалы докладов 13 Межд. науч. конф. «Тинчуринские чтения», 26 апр. 2018 года. С 110 – 112.

11. Киен Н.Т., Тунг Ч.В. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом протонного магнитного резонанса // Материалы докладов 21 Аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика Казань, КГЭУ, 5-6 декабря 2017 г. С 353-357.

12. Kashaev R.S., Kozelkov O.V., Tung T.V., et al. On-line flow proton magnetic resonance analyzer. V Межд. науч. конф. Fundamental and applied research in nanotechnology. Munich, Germany, 31.10.-5.11. 2018. Опубликовано в «International journal of applied and fundamental research».

13. Deng F., Wang X.M., T.Lulin Y, et al. Online NMR flowing fluid measurements. Appl. Magn. Reson. 2016. V.47. Iss.11. pp.1239-1253.

14. Khasanova N., Sakharov B., Volkov V., Nurgaliev D. Low field method for analysis of heavy oils without extraction. 17-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2017, 2017. Viena, Austria, pp.297-304.

15. Kashaev R.S., Kien N.T., Tung Ch.V., et al. Correlation of Physicochemical Properties of Bach Ho Oils with Proton NMR Relaxation Parameters and Their Temperature Dependence. Petroleum Chemistry. 2019. Vol. 59(1). pp. 21–29.

Авторы публикации

Нгуен Тхи Киен – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Timothy Mark. EP 0 691 526 A1 G01F1/74 “Method and apparatus for the determination of the individual mass flow rates of the multicomponent flow”, 1998. *inventor: Bayer, Alwin D-91171 Greding (DE), representative: Gregory, Northampton NNI SEL (GB)*.

2. Kalabin GA, Kanitskaya LV, Kushnarev DF. Kolichestvennaya spektroskopiya YaMR prirodnogo organicheskogo syr'ya i produktov ego pererabotki . M.: Khimiya. 2000. 410.

3. Kashaev RS, Kien NT, Tung ChV, et al. Ekspress-metody protonnoi magnitno-rezonansnoi relaksometrii. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2019;86(5):807-812.

4. Kashaev RS, Temnikov AN, Tung Ch.V, et al. Relaksometr protonnogo magnitnogo rezonansa. *Zhurnal pribory i tekhnika eksperimenta*. 2019;(2):145-148.

5. Kashaev RS, Suntsov IA, Kien NT, et al. Ekspress-metod i apparatura protonnogo magnitnogo rezonansa. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2019;86(2):263-268.

6. Kien NT, Tung ChV. Kontrol' parametrov nefiti i upravleniya neftedobychei po dannym PMR analizatora. *Materialy dokladov XII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Tinchurinskie chteniya»*. 26 – 28 aprelya 2017 g, Kazan', KGEU. pp.280-283.

7. Kien NT, Tung ChV, Kashaev RS. Elektro-apparatnyi kompleks dlya protochnogo kontrolya parametrov nefiti. Sb. statei po materialam Mezhd. n./pr. konferentsii. Nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: opyt, problemy i perspektivy razvitiya, Ufa, *Vestnik nauka* Pt.1. 2019.

8. Kien NT, Tung Ch, Kashaev RS. Opredelenie parametrov skvazhinnoi zhidkosti protochnym PMR-Analizatorom. *Materialy dokladov IV Povolzhskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivo d i toplivo-energeticheskome komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve, Kazan', FGBOU VO KGEU, 6-7 dekabrya 2018. pp 147-150*

9. Kashaev RS, Tung ChV, Kien NT, et al. Protochnyi analizator nefti na baze protonnogo magnitnogo rezonansnogo relaksometra. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam I Mezhd. n./pr. konferentsii*, 30 iyunya 2018, g. Smolensk. pp.89-90.

10. Kien NT, Tung ChV. Blok priemnika perenosnogo avtonomnogo protonnogo magnitnogo rezonansnogo relaksometra. *Materialy dokladov XIII Mezhd. nauch. konf. «Tinchurinskie chteniya»*, 26 apr. 2018. pp 110-112.

11. Kien NT, Tung ChV. Ustroistvo dlya izmereniya sostava i raskhoda mnogokomponentnykh zhidkosti metodom protonnogo magnitnogo rezonansa. *Materialy dokladov XXI Aspirantsko-magisterskii nauchnyi seminar, posvyashchennyi Dnyu energetika Kazan'*, KGEU, 5-6 dekabrya 2017. pp 353-357.

12. Kashaev RS, Kozelkov OV, Tung TV., et al. On-line flow proton magnetic resonance analyzer. *V Mezhd. nauch. konf. Fundamental and applied research in nanotechnology*. Munich, Germany, 31.10.-5.11. 2018. Опубликовано в «International journal of applied and fundamental research».

13. Deng F, Wang X.M, Lulin YT, et al. Online NMR flowing fluid measurements. *Appl. Magn. Reson.* 2016;47(11):1239-1253. doi: 10.1007/s00723-016-0832-2.

14. Khasanova N, Sakharov B, Volkov V, et al. Low field method for analysis of heavy oils without extraction. *17-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2017*. 2017. Viena, Austria, pp. 297-304.

15. Kashaev RS, Kien NT, ChV. Tung , et al. Correlation of Physicochemical Properties of Bach Ho Oils with Proton NMR Relaxation Parameters and Their Temperature Dependence. *Petroleum Chemistry*. 2019;59(1):21-29. doi: 10.1134/S0965544119130073.

Authors of the publication

Nguyen Chi Kien – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: nckien@cnd.edu.vn.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

30.12.2019г.



ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

А.В. Голенищев-Кутузов, Л.В. Ахметвалеева, Г.Р. Еникеева, Д.А. Иванов,
А.В. Семенников, Г.Д. Марданов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
alex.kutuzov@mail.ru

Резюме: На основе ранее разработанного на кафедре ПЭС КГЭУ двухканального дистанционного метода измерения, набора характеристик ЧР с одновременным использованием электромагнитных и акустических датчиков, позволяющего дистанционно измерять и оценивать техническое состояние высоковольтных изоляторов (ВИ). В статье изложены результаты разработок в развитие ранее предложенного метода, позволившего определять не только вид и место расположения дефекта, но и его размеры и степень влияния на рабочее состояние ВИ. Особое внимание обращено на эволюцию дефектов под действием перенапряжения и других электрофизических процессов в условиях эксплуатации. В частности, недавно была обнаружена генерация сверхбольших ЧР, способных создавать эрозию диэлектрических поверхностей дефектов, выполнено обследование технического состояния высоковольтных полимерных изоляторов. Все измерения выполнялись на экспериментальном стенде путем бесконтактного приема импульсных сигналов ЧР электромагнитным перестраиваемым приемником в диапазоне 50-600 МГц. Осуществлялась их индикация и компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов ЧР, которые либо не превышают допустимый порог для возникновения дефектов и их развития, по сравнению с эталонным ВИ, или превышают его. По результатам предварительных стендовых испытаний на модельных образцах и реальных ВИ в условиях эксплуатации, и полученного набора параметров ЧР, были установлены диагностические признаки, позволяющие определить вид, места расположения наиболее опасных дефектов и степень их влияния на работоспособность ВИ. При этом, наличие наиболее опасных дефектов определяется расширением фазовых интервалов излучения ЧР, резким увеличением ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, а также по значительному отличию ширины и формы одиночных импульсов ЧР.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, дефекты, частичные разряды.

Благодарности: Научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2020-172.

Для цитирования: Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127.

REMOTE TESTING FOR DEFECTS IN SERVICE HIGH-VOLTAGE INSALATORS

A.V. Golenishchev-Kutuzov, L.V. Akhmetvaleeva, G.R. Enikeeva, D.A. Ivanov,
A.V. Semennikov, G.D. Mardanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
e-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Abstract: *On the basis of the two-channel remote measurement method previously developed at the Department of PES KGEU, a set of characteristics of the PD with the simultaneous use of electromagnetic and acoustic sensors, which allows you to remotely measure and evaluate the technical condition of high-voltage insulators (HVI). The article presents the results of developments in the development of the previously proposed method, which allowed to determine not only the type and location of the defect, but also its size and the degree of influence on the working condition of the VI. Particular attention is paid to the evolution of defects under the influence of overvoltage and other electrophysical processes in operating conditions. In particular, the generation of ultra-large PDs that can create erosion of the dielectric surfaces of defects was recently discovered, and the technical condition of high-voltage polymer insulators was examined. All measurements were performed on an experimental bench by non-contact receiving pulse signals of the PD by an electromagnetic tunable receiver in the range of 50-600 MHz. Their indication and computer processing were carried out in order to determine in each of the discrete intervals of the phase voltage the average values of the number and intensity of PD pulses, which either do not exceed the allowable threshold for the occurrence of defects and their development, in comparison with the reference HVI, or exceed it. Based on the results of preliminary bench tests on model specimens and real HVIs under operating conditions, and the obtained set of PD parameters, diagnostic signs were established that made it possible to determine the type, location of the most dangerous defects and the degree of their influence on the HVI working capacity. At the same time, the presence of the most dangerous defects is determined by the expansion of the phase intervals of PD radiation, a sharp increase in PD in negative half-periods of high voltage compared with positive half-periods, and also by a significant difference in the width and shape of single PD pulses.*

Keywords: *remote diagnostics, high-voltage insulators, defects, partial discharges.*

Acknowledgments: *Scientific research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement 075-15-2020-172.*

For citation: Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR, Ivanov DA, Semennikov A.V, Mardanov GD. Remote testing for defects in service high-voltage insalators // *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-117-127.

Введение

В связи с актуальностью проблемы бесконтактной диагностики высоковольтных изоляторов (ВИ) в процессе эксплуатации, возникла необходимость в разработке новых методов диагностики содержащихся в них дефектов, дополняющих уже существующие методы, рекомендованные ГОСТ Р 55191 и международным стандартом IEC 60060-1:2010. До настоящего времени, одним из наиболее эффективных является способ,

использующий частичные разряды (ЧР) для определения рабочего состояния ВИ. Основными проблемами при их использовании является неразработанность соответствующей аппаратуры и отсутствие нормированных параметров ЧР для реальных ВИ. На кафедре ПЭС КГЭУ в последние годы был разработан комплексный метод, с одновременным использованием электромагнитных и акустических датчиков, позволяющий дистанционно измерять набор характеристик ЧР и по ним судить о техническом состоянии ВИ [1]. В статье изложены результаты по развитию ранее предложенного метода, позволившего определять не только вид и место расположения дефекта, но и его размеры и степень влияния на рабочее состояние ВИ. Особое внимание обращено на развитие дефектов под действием перенапряжения и других электрофизических процессов в условиях эксплуатации. В частности, недавно была обнаружена генерация сверхбольших ЧР [2], способных создавать эрозию диэлектрических поверхностей дефектов, однако особенности возникновения сверхбольших ЧР на модельных образцах до сих пор не были вполне изучены, хотя, какого-либо обсуждения подобных индуцированных эффектов в высоковольтных изоляторах, по нашим данным, не проводилось [3-6].

Аппаратура, методика измерений и образцы

Все измерения выполнялись на экспериментальном стенде [7] путем бесконтактного приема электромагнитных импульсов ЧР всеволновой телевизионной антенной «Дельта Н111-01», с коэффициентом усиления 28 дБ, соединённой с широкополосным перестраиваемым приёмником «AOR AR 5000A», позволяющим детектировать сигналы в интервале частот 0.5–800 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется активной параболической антенной «ParaDish-2», соединённой с приёмником «SDT-270» на частоте 40 кГц. В дальнейшем проходила компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов ЧР, которые либо не превышают допустимый порог для возникновения дефектов и их развития по сравнению с эталонным ВИ, или превышают его.

Изоляторы с ЧР первого типа мы отнесли к классу бездефектных, и с ЧР второго типа к дефектным изоляторам. Такое разделение, конечно, имеет несколько условный характер, поскольку до сих пор для ВИ нет нормативных документов по оценке дефектов по характеристикам ЧР. При этом наличие наиболее опасных дефектов определяется расширением фазовых интервалов излучения ЧР, резким увеличением ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, а также по значительному отличию ширины и формы одиночных импульсов ЧР. Для измерения параметров характеристик ЧР в зависимости от приложенного напряжения использовался регулируемый источник переменного высокого напряжения.

В качестве исследуемых образцов использовались полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации и имевшие различные дефекты. Виды дефектов, их размеры и местоположение были вначале оценены визуально, а затем на стенде были измерены наборы характеристик ЧР, соответствующие видам дефектов, в зависимости от приложенного напряжения (до 40 кВ). Накопление сигналов ЧР выполнялось в течение 18 с, что вполне удовлетворяло стохастическому характеру возникновения ЧР. Это позволяло обнаруживать сверхбольшие ЧР, периодичность которых не превышала 1-5 раз за период сети.

Результаты обследования ВИ

В результате сравнительного анализа данных после компьютерного накопления и обработки сигналов ЧР в виде набора характеристик, соответствующих каждому виду дефектов в ВИ, визуальным осмотром были выделены малодефектные и содержащие крупные дефекты ВИ. В свою очередь, последние были разделены на: содержащие

дефекты на стержне и имевшие нарушение контакта между стержнем и концевателем. Однако главным отличием ВИ первой и второй групп стало обнаружение в ВИ с крупными дефектами сверхбольших ЧР. Примеры характеристик ЧР для малодефектных ВИ представлены на рис. 1.

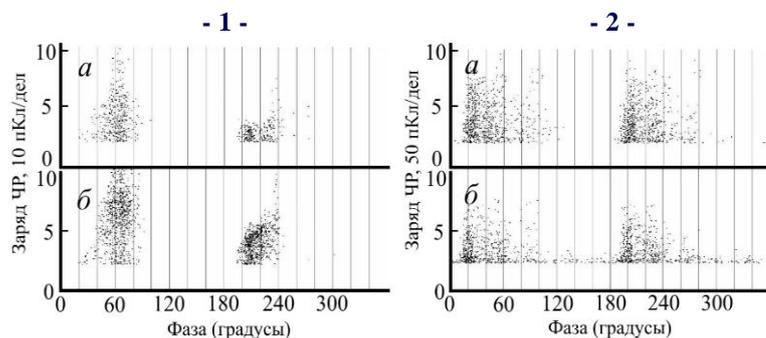


Рис.1. Амплитудно- фазовые характеристики ЧР малодефектного (1) и дефектного (2) полимерных ВИ ЛК 70/35, измеренные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками.

Характеристики ЧР симметричны для обоих фазовых интервалов, ширина которых увеличивается с ростом размеров дефектов на стержне. Также наблюдалась однозначность характеристик ЧР, измеренная с помощью электромагнитных и акустических датчиков. Характеристики ЧР для малых дефектов на стержне и стержне-оконцевателе, на которых не сказывалось влияние небольших индуцированных полей, незначительно отличались друг от друга. Значительно отличались характеристики ЧР для крупных дефектов. Если для мелких дефектов ЧР возникали вблизи максимальных фазовых значений приложенного напряжения (90° и 270°), и постепенно возникающие ЧР снижались до 30° - 40° и 210° - 290° , а вблизи 0° и 180° ЧР отсутствовали, то для крупных дефектов максимальное количество и интенсивность были обнаружены именно вблизи нулевых и 180° значений фаз приложенного поля.

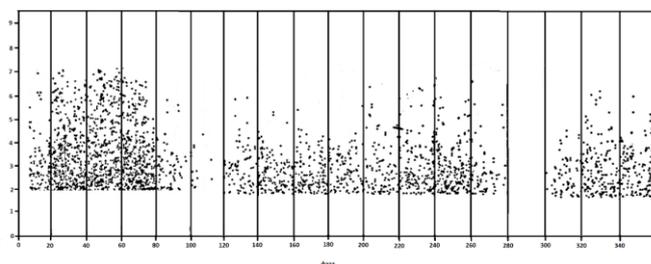


Рис.2. Амплитудно-фазовая характеристика ЧР для ВИ ЛК 70/35 с большим дефектом на стержне.

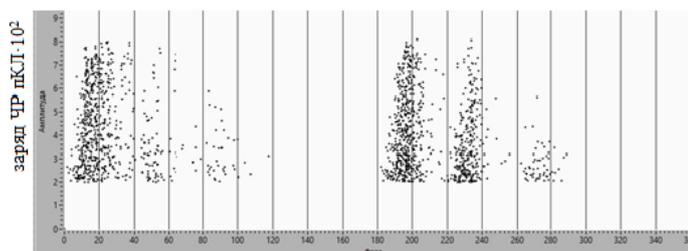


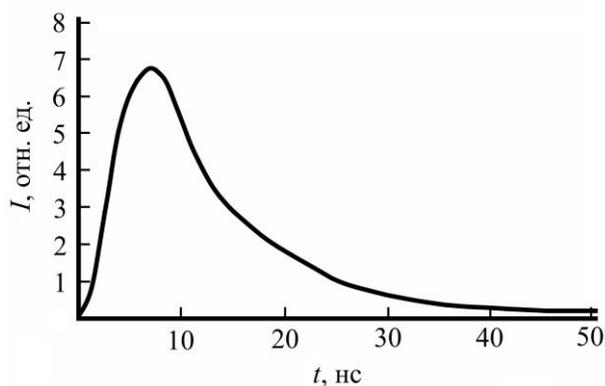
Рис.3. Амплитудно-фазовая характеристика ЧР для ЛК 70/35 с большим дефектом стержень-оконцеватель.

На рис. 2 представлены характеристики ЧР на стержне, а на рис. 3 – подобная характеристика для дефекта стержень-оконцеватель. Отличие характеристик состоит в переходе от почти симметричного, в первом случае, – фазового распределения интенсивностей и количества ЧР, – к несимметричному фазовому распределению параметров ЧР.

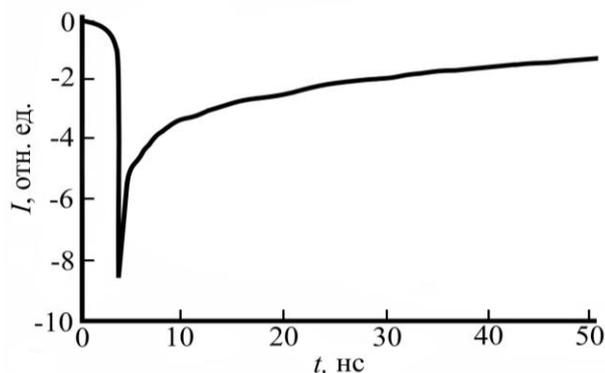
Вид дефекта отражается и на форме импульсов ЧР. Это обстоятельство неоднократно пытались использовать для контроля и определения дефектов в ВИ. Однако само измерение формы импульсов при использовании контактного метода связано с определенными дополнительными сложностями, зависящими от метода детектирования. В различных способах детектирования, на форму импульсов влияют параметры резонансных контуров, резистивные или емкостные связи, поэтому в ряде случаев наблюдались как экспоненциальные, так и колебательные формы с различной длительностью самих импульсов ЧР [8-10]. По-видимому, наиболее точную форму и длительность импульса можно определить с помощью детектирования импульсов бесконтактным электромагнитным методом на высоких (10^8 - 10^9 Гц) частотах.

Теоретическое моделирование формы и длительности импульсов ЧР для уже рассмотренного выше дефекта электрод-полость и диэлектрик-электрод было выполнено в работе [11]. Было установлено, что процесс возникновения ЧР в полости различен для положительных и отрицательных разрядов. Поскольку положительные разряды возникают за счет дрейфа положительных зарядов вдоль оси z к поверхности диэлектрика, то вследствие малой подвижности ионов, время их прибытия на поверхность больше, чем для перемещающихся индуцированных полем электронов. Это обстоятельство отражается на форме положительных импульсов (рис. 4 а) с относительно медленно возрастающей частью импульса ЧР. Отрицательные импульсы ЧР по сравнению с положительными импульсами имеют более острую форму нарастания интенсивности (рис. 4 б), определяемую большей скоростью перемещения электрона к поверхности диэлектрика при отрицательном полупериоде приложенного напряжения. Дальнейшее более плавное уменьшение как положительного, так и отрицательного импульсов ЧР, как предположено в [11], связано с перемещением положительных и отрицательных зарядов по поверхности диэлектрика. Индуцированные электроны не участвуют в этом процессе, поскольку сразу же поглощаются ионами. Растущие передние части положительного и отрицательного импульсов ЧР носят стримерный характер.

После достижения положительными ионами поверхности полости площадь разряда начинает возрастать, что не характерно для отрицательного ЧР, а ток положительного ЧР начинает спадать, что приводит к постепенному однородному распределению электрического поля на поверхности диэлектрика, граничащего с полостью.



а)



б)

Рис. 4. Теоретическая форма импульсов ЧР на дефекте «электрод-полость-полимер»: а – положительный импульс, б – отрицательный импульс

Меньшая электрическая прочность границы раздела двух диэлектрических сред с различными диэлектрическими и электрическими характеристиками, как показали исследования последних лет [12, 13] объясняются, по крайней мере, совокупностью нескольких факторов: искажением электрического поля, параметрами воздействующего электрического напряжения, подпиткой развивающегося разряда через емкость изолятора, особенностями контакта электродов с изолятором, положение изолятора относительно силовых линий электрического поля.

Обсуждение полученных результатов

До настоящего времени, теоретическому [14, 15] и менее распространенному – экспериментальному [16] изучению характеристик ЧР на дефектах, было посвящено значительное количество исследований. Однако в большинстве из них рассматривались особенности ЧР на дефектах в виде трещин или полостей в эталонных диэлектрических материалах с однородной структурой матрицы (фарфор или эпоксидная смола) [17, 18].

В то же время, в высоковольтных изоляторах (ВИ) используются, как минимум, два материала (диэлектрические стержни и металлические электроды-фланцы в керамических ВИ) и три материала (фланцы, стеклопластиковые стержни (или трубки) и резиновые ребристые оболочки в полимерных ВИ). Во всех случаях ЧР возникают в условиях наличия каких-либо дефектов уже при приложении стандартного рабочего напряжения. Более того, в ряде случаев, особенно в полимерных ВИ, сами ЧР являются причиной ускоренного старения ВИ. В большинстве случаев ЧР возникают при частичном (неполном) электрическом пробое воздушного промежутка, поскольку в нем напряженность E_k приложенного электрического поля E_a выше, чем в однородном диэлектрике E_i :

$$E_k = (\epsilon_D/\epsilon_B)E_i \quad (1),$$

где ϵ_D и ϵ_B соответственно диэлектрические проницаемости твердого диэлектрика и воздуха (газа).

Повышение напряженности в воздушном зазоре будет приводить к изменению значений поля пробоя. При этом ионизационные процессы (тлеющий и частичный разряды) будут начинаться при существенно меньшем напряжении, чем в основном изоляционном промежутке. Продукты ионизации (свободные электроны и ионы) выходят из воздушного промежутка на поверхность диэлектрика и инициируют его дальнейший пробой или перекрытие при пониженном напряжении. При этом, практически всегда пробой происходит не за счет разряда непосредственно через диэлектрик, а через его границу с воздухом ($U_{пер}$). Это наиболее характерно для опорных изоляторов.

Электрическому пробую газового промежутка предшествует несколько этапов ионизации. На первом из них первичные электроны, в основном испускаемые с электродов, ионизируют нейтральные атомы и создают дополнительные электроны. Эти движущиеся в электрическом поле электроны образуют лавины. Для образования электрического разряда, причем первичный разряд имеет вид отдельных узких струек (стримеров), необходимо, чтобы каждый электрон на пути d_0 между электродами осуществлял определенное число ионизаций K :

$$K = \alpha d_0 \quad (2),$$

где α – коэффициент ударной ионизации.

В реальных условиях коэффициенту K можно сопоставить напряжение электрического пробоя $U_{пр}$:

$$U_{пр} = \alpha \frac{P}{P_0} d_0 + b \sqrt{\frac{P}{P_0}} d_0, \quad (3),$$

где P - давление газа, P_0 - нормальное давление (101,3 кПа, $T = 293$ К).

Для воздуха при нормальных условиях ($P=P_0$) $\alpha = 24,5$ кВ/мм, $b = 6,4$ кВ/см. Таким образом, в первом приближении

$$U_{пр} \approx \alpha d_0, \quad (4),$$

т. е. пробивное напряжение линейно растет с увеличением разрядного промежутка.

При возникновении локального перенапряжения E_k , превышающего пороговое поле электрической прочности (E_b), возникают ЧР. Случайное распределение моментов ЧР и сильная вариация их интенсивностей позволяет относить природу ЧР к стохастическим процессам. Сложность определения параметров ЧР также зависит от эволюции распределения электрических полей внутри промежутка пробоя во временном интервале воздействия высокого напряжения.

Как уже обсуждалось во введении, в ряде работ по компьютерному анализу моделирования приповерхностного дефекта, представленного в виде сферической полости в полимере [3-6], рассматривалось влияние индуцированных полей от предыдущих ЧР на последующие заряды. В данной работе мы использовали подобное представление для построения более реалистичной модели электрофизических процессов ЧР, в зависимости от вида и размеров дефектов в полимерных ВИ, с учетом обнаружения сверхбольших ЧР. Особенностью сверхбольших ЧР является участие в процессе их излучения индуцированного предыдущими ЧР зарядового поля на диэлектрических поверхностях дефекта. Заряды создаются ионами и электронами в полости дефекта при ионизации воздуха в нем стримерными ЧР, а затем осаждаются на поверхностях в виде полей [$E_{чр}$]. Интенсивности полей последующих ЧР определяются геометрической комбинацией приложенного к ВИ поля E_a и индуцированного поля E_i (рис. 5).

При одинаковых знаках E_a и E_i , поле $E_{чр}$ возрастает, а при разных знаках – убывает. Наибольшее количество и интенсивность будут у отрицательных ЧР, создающихся суммой отрицательных по знаку полей E_a и E_i , соответствующих фазовым интервалам 130° – 230° , фазовые интервалы положительных ЧР 0° – 20° и 300° – 360° , в основном, создаются полями положительно индуцированных зарядов на поверхностях дефекта. Равномерное распределение числа и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения зарядов на обеих поверхностях дефекта в приложенном поле – например, дефекту на стержне. Резкая фазовая асимметричность возникновения сверхбольших ЧР с превышением отрицательных ЧР, на наш взгляд, определяется асимметричностью зарядовых полей на дефекте.

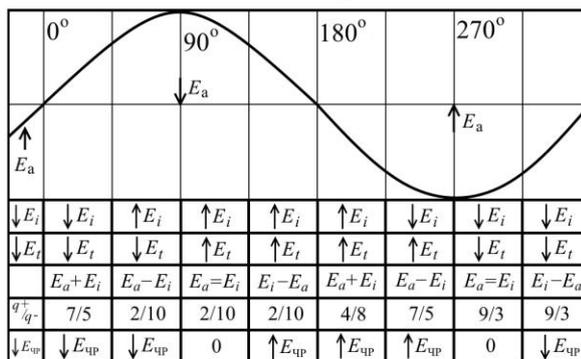


Рис.5. Схема фазового распределения градиентов приложенного поля E_a и индуцированного поля зарядов E_i , поля ЧР (E_{cp}), и суммарного поля $E_t = E_a \pm E_i$.

Такой вид дефекта характерен для плохого контакта между стержнем ВИ и металлическим оконцевателем. Подобное отличие характеристик ЧР позволяет разделять наиболее часто встречающиеся дефекты на стержне и контакте стержень-оконцеватель. Было обнаружено изменение интенсивности и фазового смещения в сторону меньших углов сверхбольших ЧР. Однако интенсивность и количество отрицательных ЧР возрастает, а положительных ЧР уменьшается. Особенно этот процесс характерен для дефектов стержень-оконцеватель. Наиболее сильные изменения в характеристиках ЧР наблюдались с ростом размеров дефектов, т. е. с увеличением длины воздушного промежутка в зазоре между двумя диэлектрическими поверхностями (дефект на стержне) или в зазоре между диэлектриком и металлом (дефект стержень-оконцеватель). От размеров воздушного зазора, даже при стандартном приложенном напряжении, зависят условия возникновения ЧР и последующего накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта. Этот эффект может быть объяснен увеличением скорости перемещения зарядов и их плотности на диэлектрических поверхностях полости дефекта. Возрастание интенсивности и количества сверхбольших ЧР на дефекте типа «стержень-оконцеватель», по-видимому, чаще всего, являются причиной выхода из строя полимерных ВИ, что уже ранее наблюдалось на ряде подстанций [8].

Закключение

Главным итогом наших исследований является обнаружение сверхбольших ЧР, способных ускорять процесс деградации поверхности уже существующих дефектов. Такая деградация приводит к увеличению размеров дефектов и последующему пробоям ВИ. Причем, первоначальные размеры дефектов или неоднородностей диэлектрика являются определяющим фактором в развитии пробоя. Необходимым элементом подобного пробоя служит такой размер дефекта или неоднородности, при котором при рабочем напряжении на них возникают первичные ЧР. Таким образом, как показали наши эксперименты, сверхбольшие ЧР являются не только индикатором дефектов в ВИ, но сами могут становиться причиной ускоренного старения высоковольтных диэлектрических элементов. Вследствие этого, при анализе характеристик ЧР необходимо не только учитывать параметры обычных ЧР, но и, путем накопления периодов измерения, определить наличие сверхбольших ЧР, их интенсивность и количество за один период фазы высокого напряжения.

Литература

1. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент на изобретение № 2679759. РФ. 21.03.2018.
2. Salustiano R., Capelini R. M., de Abreu S. R. et al. Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools / ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 8-11 Sept. 2014. IEEE. 2014. P. 1-4.
3. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. N. 24. P. 245202.
4. Callender G., Golosnoy I. O., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.
5. Wu K., Pan C., Meng Y., Cheng Y. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. N. 2. P. 612-619.
6. Villa A., Barbieri L., Gondola M., et al. A PDE-based partial discharge simulator // Journal of Computational Physics. 2017. V. 345. P. 687-705.
7. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Иванов Д. А., и др. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 87-93.
8. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. et al.. Effect of partial discharges on the operating condition of high-voltage insulators. Web of Conferences 124, 03001 (2019).
9. Broniecki U., Bergnan V., Tnittmann U. Visualization of synchronous acoustic and electric PD measurement data. Proc. 16th International Symposium High Voltage Engineering, Johannesburg, 2009, p. 196.
10. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика. Вестник УГАТУ, Уфа, 2011. Т. 15. №3. С. 98-100.
11. Pan Ch. Meng Y., Wu K., Han Z. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. J. Phys. D. Appl. Phys., V. 44, p. 255201, 2011.
12. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.
13. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика при эксплуатации. Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23-27.
14. Heitz. A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach. «J. Phys. D», «Appl.Phys». 1999. V. 32. P. 1012.
15. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов. Электричество. 2016. №6. С. 51-56.
16. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Методика исследования электрического пробоя элементов из электротехнического фарфора. «Известия вузов. Проблемы энергетики», 2003. №5-6. С. 130-134.
17. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Шмидт С.В., Крупнов Б.А. Комплексный метод регистрации параметров частичных разрядов изоляции электрооборудования. «Известия вузов. Проблемы энергетики». 2010. №9-10. С. 98-104.
18. Evagorou D., Kyprianou A., Lewin P. L. Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network. IET Sei. Meas. Technol. 2010. V.4. p. 177.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р. ф.-м. наук, заведующий кафедрой Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Ахметвалеева Ляля Вахитовна – канд. пед. наук., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Еникеева Гульсум Рауфовна – канд. ф.-м. н., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Семенников Антон Владимирович – канд. ф.-м. н., ст. преп. кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Марданов Георгий Дамирович – канд. техн. наук., асс. кафедры экономики, финансового права и информационных технологий, Казанский юридический институт МВД РФ.

References

1. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators*. Patent for invention No. 2679759. RF . 03.21.2018.
2. Salustiano R, Capelini RM, de Abreu SR, et al. *Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools / ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 8-11 Sept. 2014. IEEE, 2014. pp. 1-4.
3. Illias HA, Chen G, Lewin PL. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011;4(24):245202.
4. Callender G, Golosnoy IO, Rapisarda P, et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;51(12):125601.
5. Wu K, Pan C, Meng Y, Cheng Y. *Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. V. 20. №2. P. 612-619.
6. Villa A, Barbieri L, Gondola M, et al. A PDE-based partial discharge simulator. *Journal of Computational Physics*. 2017;345:687-705.
7. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov D. A, et al. A complex method for remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *University Bulletin. Energy issues*. 2016;5-6:87-93.
8. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Effect of partial discharges on the operating condition of high-voltage insulators. *Web of Conferences* 124, 03001 (2019).
9. Broniecki U, Bergnan V, Tnittmann U. Visualization of synchronous acoustic and electric PD measurement data. *Proc. 16th International Symposium High Voltage Engeneering*. Johannesburg, 2009, p. 196.
10. Ismagilov FR, Maksudov DV. Mathematical modeling of the development of partial discharges in the aging process of a dielectric. *Bulletin of USATU, Ufa*. 2011;15(3):98-100.
11. Pan Ch. Meng Y, Wu K, Han Z. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2011;44:255201.

© *А.В. Голенищев-Кутузов, Л.В. Ахметвалева, Г.Р. Еникеева, Д.А. Иванов, А.В. Семенников, Г.Д. Марданов*

12. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. *The Japan Society of Applied Physics*. 2016;55(2).

13. Gaivoronsky AS. Damage to polymer insulators and their diagnostics during operation. *Chief Power Engineer*. 2010;2:23-27.

14. Heitz. A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 1999;32:1012.

15. Kinsht N. V, Petrunko NN. On the estimation of the parameters of partial discharges. *Electricity*. 2016;6:51-56.

16. Avvakumov MV, Golenishchev-Kutuzov AV. Methodology for the study of electrical breakdown of elements from electrical porcelain. *University News. Energy Problems*. 2003;5-6:130-134.

17. Gataullin AM, Matukhin V. L., Schmidt S. V., Krupnov B. A. An integrated method for recording the parameters of partial discharges of insulation of electrical equipment. *University News. Energy Problems*. 2010;9-10:98-104.

18. Evagorou D, Kyprianou A, Lewin PL. *Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network*. IET Sei. Meas. Technol, 2010;4:177.

Authors of the publication

Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: alex.kutuzov@mail.ru.

Liliya V. Akhmetvaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Gulsum R. Enikeeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmitriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton V. Semennikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Georgiy D. Mardanov – Kazan Low Institute, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

29.02.2020г.