

**Том. 20 № 11-12/2018 ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ
С О Д Е Р Ж А Н И Е**

ЭНЕРГЕТИКА

САВИНА Н.В., БОДРУГ Н.С. Оценка возможности обеспечения качества электроэнергии в части отклонения напряжения потребителями.	3
ВАСЕВ А.Н., МИСБАХОВ Р.Ш., ЗИГАНШИНА А.И., ФЕДОТОВ В.В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок.	16
КУЗЬМИН В.А., ЗАГРАЙ И.А., ДЕСЯТКОВ И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области.	27
ГЛУХОВ Д.А., ХАКИМЗЯНОВ Э.Ф., ТИТОВ Д.Е., УГАРОВ Г.Г., МУСТАФИН Р.Г. Анализ риска отказа линейной изоляции путем оценки поперечной проводимости воздушных линий электропередач по данным синхронизированных векторных измерений.	34
ВОЛОТКОВСКАЯ Н.С., СЕМЁНОВ А.С., ФЕДОРОВ О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей республики Саха (Якутия).	46
ЯРЫШ Р.Ф., ГАРИФУЛЛИНА А.Р., ГАРИФУЛЛИН Р.И., ЯКУНИН А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки.	56
МОСКАЛЕНКО Н.И., ДОДОВ И.Р., КАЮМОВА Г.В., ХАЕРТДИНОВА А.Р., ХАМИДУЛЛИНА М.С., ШЕШУКОВ Е.Г. Моделирование радиационных характеристик газовой фазы продуктов сгорания на базе высокотемпературных атласов параметров спектральных линий.	65
ГРАЧЕВА Е.И., АЛИМОВА А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях.	81
ВИДИН Ю.В., КАЗАКОВ Р.В., ЗЛОБИН В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле.	93
ФЕТИСОВ Л.В., РОЖЕНЦОВА Н.В., БУЛАТОВ О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения.	99
ДОНСКОЙ И.Г. Математическое моделирование газификации древесины с разложением смолистых продуктов на частицах активных компонентов.	107
САДЫКОВ М.Ф. Комплексный метод и автоматизированная многофункциональная установка для исследования ряда физических свойств перспективных материалов.	118

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

MAJID ABDULHAMEED ABDULHY AL-ALI, V.YU. KORNILOV, A.G. GORODNOV Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at rumila field.	127
АФАНАСЬЕВ А.Ю., РЫБУШКИН Н.А., КИЛИМАНОВ К.А. Моделирование и оптимизация по энергопотреблению гибридной силовой установки для транспортного средства.	133
КОЗЛОВ В.К., ГАРИФУЛЛИН М.Ш., САБИТОВ А.Х., ГИНИАТУЛЛИН Р.А. Люминесцентные свойства бумажной изоляции маслонаполненных трансформаторов.	144

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

КАШАЕВ Р.С., СВИНИН А.Ю., КОЗЕЛКОВ О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации.	152
--	-----

ФИЗИКА

КОНАХИНА И.А., ХУСНУТДИНОВА Э.М., КАДЫЙРОВ А.И., ВАЧАГИНА Е.К. Теплообмен при ламинарных течениях вязкой жидкости в каналах с трехзаходными шнековыми вставками при больших числах Пекле.	161
--	-----

Указатель статей за 2018 г.	170
----------------------------------	-----

**Vol. 20 № 11-12 /2018 ENERGY SECTOR PROBLEMS
C O N T E N T S**

POWER ENGINEERING

N.V. SAVINA, N.S. BODRUG. To assess the possibility of ensuring the quality of electricity in terms of voltage deviations of consumers.	3
A.N. VASEV, R.SH. MISBAKHOV, A.I. ZIGANSHINA, V.V. FEDOTOV. Combine communications optical network of SCADA of electric power station and substation.	16
V.A. KUZMIN, I.A. ZAGRAI, I.A. DESIATKOV. Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits.	27
D.A. GLUKHOV, E.F. KHAKIMZYANOV, D.YE. TITOV, G.G. UGAROV, R.G. MUSTAFIN. Analysis of risk of failure of linear insulation by evaluating the cross-second conductivity of transmissions lines by data of synchronized vector measurements.	34
N.S. VOLOTKOVSKAYA, A.S. SEMENOV, O.V. FEDOROV. Analysis of structure and technical condition of western electric networks of the republic of Sakha (Yakutia).	46
R.F. YARISH, A.R. GARIFULLINA, R.I. GARIFULLIN, A.N. YAKUNIN. Investigation of operating modes of frequency-regulated electric drive of pumpjack.	56
N.I. MOSKALENKO, I.R. DODOV, G.V. KAYUMOVA, A.R. KHAERTDINOVA, M.S. KHAMIDULLINA, E.G. SHESHUKOV. Modelation of the radiation characteristics of the gas phase combustion products based on high themperature atlases of spectral line parameters.	65
E.I. GRACHEVA, A.N. ALIMOVA. Possible errors of calculations of losses of the electric power on shop industrial networks.	81
U.V. VIDIN, R.V. KAZAKOV, V.S. ZLOBIN. The process of heat transfer in two-layered cylindrical body.	93
L.V. FETISOV, N.V. ROZHENCOVA, O.A. BULATOV. Improving the quality of electric power in low voltage networks.	99
I.G. DONSKOY. Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles.	107
M.F. SADYKOV. Complex method and automated multifunctional installation for research the physical properties of perspective materials.	118

ELECTRICAL ENGINEERING

MAJID ABDULHAMEED ABDULHY AL-ALI, V.YU. KORNILOV, A.G. GORODNOV. Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at rumila field.	127
A.Y. AFANASIEV, N.A. RYBUSHKIN, K.A. KILIMANOV. Modeling and optimization on energy consumption of a hybrid power installation for a vehicle.	133
V.K. KOZLOV, M.SH. GARIFULLIN, A.KH. SABITOV, R.A. GINIATULLIN. Fluorescent properties of paper insulation of oil-filled transformers.	144

**INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING
DEVICES AND SYSTEMS**

P.S. KASHAEV, A.YU. SVININ, O.V. KOZELKOV. Minimization of experiment errors in the method of PMR and opportunities for receiving of relaxation times spectra.	152
---	-----

PHYSICS

I.A. KONAKHINA, E.M. KHUSNUTDINOVA, A.I. KADYIROV, E.K. VACHAGINA. Heat transfer for laminar viscous flows in a tube fitted with triple twisted fins on rod under large Peclet numbers.	161
--	-----

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.316

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЧАСТИ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

Н.В. Савина, Н.С. Бодруг

Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия
bodrug82@rambler.ru

Резюме: В статье рассмотрен вопрос оценки возможности обеспечения качества электроэнергии в части отклонения напряжения потребителями. Проведен анализ характеристики современных рынков энергии и мощности. Выявлено, что переход на новые рыночные отношения оставляет без возможности регулирования напряжения потребителей, которые являются участниками розничных рынков. Предложен порядок оценки возможности обеспечения требуемого качества электроэнергии на выводах электроприемников и показана ее реализация на примере реальных электрических сетей. Разработаны рекомендации для решения проблемы регулирования напряжения у потребителя.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрические сети, технические средства регулирования напряжения, нормирование, методика оценки.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-3-15.

Для цитирования: Савина Н.В., Бодруг Н.С. Оценка возможности обеспечения качества электроэнергии в части отклонения напряжения потребителями // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 3-15. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-3-15.

TO ASSESS THE POSSIBILITY OF ENSURING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN TERMS OF VOLTAGE DEVIATIONS OF CONSUMERS

N.V. Savina, N.S. Bodrug

Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
bodrug82@rambler.ru

Abstract: The article deals with the issue of assessing the possibility of ensuring the quality of electricity in terms of voltage deviation by consumers. The analysis of the characteristics of modern markets, energy and power. It is revealed that the transition of the new market economy is left without the possibility of regulating the voltage consumers, which are parties to retail markets. The order of an assessment of possibility of providing the required quality of the electric power on conclusions of electric receivers is offered and its realization on the example of real electric

networks is shown. Recommendations were developed to address the problem of voltage regulation at the consumer.

Keywords: quality of electric energy, electric networks, technical means of regulation of tension, rationing, assessment technique.

For citation: N.V. Savina, N.S. Bodrug To assess the possibility of ensuring the quality of electricity in terms of voltage deviations of consumers. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 3-15. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-3-15.

С интенсивным развитием энергетики и переходом на рыночные отношения ГОСТ 13109-97 перестал действовать и вышел новый ГОСТ 32144-2013 [1]. Действующий в настоящее время ГОСТ устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии (КЭ) в точках передачи электрической энергии (далее ТПЭ) пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц. Именно в ТПЭ происходит обращение электроэнергии в товар в соответствии с договором на поставку или на услуги по передаче электрической энергии установленного качества, ответственность за которое несет сетевая организация. В соответствии с ГОСТ [1] потребитель обязан на своей стороне обеспечить условия, при которых отклонения напряжения питания на выводах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений, если выполняются требования настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии. Следовательно, на потребителей также возлагается ответственность за обеспечение требуемого КЭ. Проблема, которая ложится на плечи потребителя, является более широкой и охватывает и изготовителей, и монтажников. Необходимо выпускать оборудование, не относящееся к промышленному, с более широким диапазоном отклонения напряжения и более устойчивое к помехам, связанным с КЭ. Например, в технических характеристиках домашних бытовых приборов допустимые отклонения напряжения составляют: стиральная машина – 10 %, микроволновая печь – 5%, холодильник $\pm 10\%$.

При таких технических характеристиках электроприемников выясняется, что на сегодняшний день более чем у 80% низковольтных непромышленных потребителей не обеспечивается требуемое качество электроэнергии [2].

Регулированием напряжения занимается системный оператор, технические возможности по регулированию напряжения гораздо шире у энергетических компаний. У непромышленного потребителя такие возможности ограничены. В связи с этим, оценка возможности обеспечения требуемого КЭ по [1] проводилась в части отклонения напряжения, характеризующего медленными изменениями напряжения.

Исходя из этого, целью работы является: определение возможности обеспечения требований ГОСТ 32144-2013 потребителем в своих электрических сетях традиционными методами и средствами регулирования напряжения.

Данная цель реализуется решением следующих задач:

- характеристика современных рынков энергии и мощности;
- оценка возможности выполнения требований ГОСТ [1] потребителем по показателю качества электроэнергии в части медленного изменения напряжения;
- анализ эффективности регулирования напряжения в сетях потребителя традиционными методами и способами;
- разработка рекомендаций для решения проблемы регулирования напряжения потребителем в своих электрических сетях.

ГОСТ 32144-2013 регламентирует требования к КЭ в ТПЭ на рынках электрической энергии и мощности. Рынки электрической энергии делятся на оптовый и розничный.

Оптовый рынок электрической энергии и мощности (ОРЭМ) – сфера обращения электрической энергии и мощности в рамках Единой энергетической системы России в границах единого экономического пространства с участием крупных производителей и крупных покупателей электрической энергии и мощности, а также иных лиц, получивших статус субъекта оптового рынка и действующих на основе правил оптового рынка, утверждаемых в соответствии с Федеральным законом «Об электроэнергетике» [3]. В состав субъектов оптового рынка входят: участники обращения электрической энергии и мощности – поставщики электрической энергии (генерирующие компании) и покупатели электрической энергии (энергосбытовые организации, крупные потребители электрической энергии, гарантирующие поставщики), получившие статус субъектов оптового рынка в порядке, установленном законом [3]; «Совет рынка»; коммерческий оператор и иные организации, обеспечивающие в соответствии с правилами оптового рынка и договором о присоединении к торговой системе оптового рынка функционирование коммерческой инфраструктуры оптового рынка; организации, обеспечивающие функционирование технологической инфраструктуры оптового рынка (организация по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью, системный оператор) [4].

В рамках розничных рынков электрической энергии реализуется электроэнергия, приобретенная на оптовом рынке электроэнергии и мощности, а также электроэнергия генерирующих компаний, не являющихся участниками оптового рынка. Субъектами розничных рынков являются потребители, исполнители коммунальных услуг, гарантирующие поставщики, энергосбытовые, энергоснабжающие организации, производители электрической энергии (мощности) на розничных рынках, сетевые организации [5].

Как было сказано выше, крупный потребитель обладает возможностью подключаться к ОРЭМ. К ним относятся электрифицированная железная дорога, транспортные системы, крупные промышленные предприятия. Они имеют развитую систему электроснабжения и смогут решить проблему регулирования напряжения в своей сети. А потребители, которые являются участниками розничных рынков, находятся в другой ситуации по возможности регулирования напряжения в своей сети. Как правило, сети таких потребителей не развиты, выполняются на напряжение 220–380 В и питаются от трансформаторов с переключением без возбуждения (ПБВ), которые зачастую им не принадлежат.

Рассмотрим возможность обеспечения требуемого качества электроэнергии в электрических сетях потребителей. Для этого приведем порядок оценки такой возможности. Обеспечение требуемого КЭ должно осуществляться в точках передачи электрической энергии в различных сечениях, на основании договоров энергоснабжения.

В первую очередь, для оценки возможности выполнения ГОСТ [1] в части медленных изменений напряжения необходимо провести расчеты установившихся режимов. Для этого выбирается эквивалент сети, который включает в себя точки оптового и розничного рынков электроэнергии и мощности структурных подразделений (СП) распределительных сетевых комплексов (РСК). Выбираются характерные режимы. К ним относятся режимы наибольших и наименьших нагрузок, их выбор осуществляется в соответствии с [6]. Расчет режимов электрических сетей осуществляется с помощью программных вычислительных комплексов, принятых в РСК, например, *RastrWin*.

Далее проводится анализ режимов, в результате которого выделяют значения токов, потери активной и реактивной мощности, потери напряжения на участках сети, значения отклонения напряжения в ТПЭ, в характерных узлах, в том числе определяемых стандартом [7]. По результатам анализа режима строится эпюра отклонения напряжения, по которой рассматривается возможность регулирования напряжения в электрической сети различными техническими средствами и способами.

Под регулированием напряжения понимают принудительное изменение режима

напряжения в сети и у электроприемников с целью обеспечения требований [1]. Сначала используется централизованное регулирование, а в случае его недостаточности – местное. Централизованное регулирование может осуществляться только энергетическими компаниями. Такое регулирование напряжения приводит к изменению напряжения практически во всей электрической сети и осуществляется с помощью регулирования под нагрузкой (РПН). При местном регулировании напряжения изменение режима достигается только в ограниченной части сети, оно проводится с помощью ПБВ, компенсирующих устройств (КУ), вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) или линейных регуляторов (ЛР).

Трансформаторы с РПН имеют специальное переключающее устройство, позволяющее изменять число витков одной из обмоток трансформаторов без отключения нагрузки. При этом меняется коэффициент трансформации трансформаторов. Устройство РПН предусматривает регулирование напряжения в различных пределах в зависимости от мощности и напряжения трансформатора.

Для изменения режима напряжения в низковольтных сетях наиболее характерным средством является варьирование коэффициента трансформации трансформаторных подстанций с помощью устройства ПБВ, которое устанавливается на высокой стороне трансформатора. Положения ПБВ находятся в диапазоне $\pm 5\%$. Переключения осуществляются крайне редко, так как силовой трансформатор нужно отключать от сети [8].

Регулирование напряжения перераспределением потоков реактивной мощности осуществляется путем установки КУ в электрических сетях, мощность и место установки которых определяется специальным расчетом. Распределение реактивной мощности в сети осуществляется из условия баланса реактивной мощности на всех уровнях напряжения. Необходимое значение реактивной мощности может вырабатываться источниками при их различном долевом участии. Изменяя долю выработки реактивной мощности различными источниками, можно изменять потери напряжения на рассматриваемом участке сети. Изменяя мощность компенсирующего устройства, можно менять величину потери напряжения.

Одним из видов последовательных регулировочных трансформаторов являются ЛР, которые включаются последовательно в линию или в цепь трансформатора без РПН, обеспечивая регулирование напряжения в пределах $\pm 10\text{--}15\%$.

ВДТ включаются также и позволяют регулировать напряжение в цепи нагрузки путем расширения витков обмоток. На сегодняшний день широкое применение нашли вольтодобавочные трансформаторы марки ТВМГ-26/70-380 с номинальной мощностью 26 кВА. По своей мощности они приемлемы для не промышленных потребителей. Данное техническое решение предлагается к реализации как наиболее перспективное по причине автономности работы, наличия элементов интеллектуального поведения (режим байпас и восстановление режима компенсации после ликвидации аварийного режима), отсутствия необходимости эксплуатации и минимальных капитальных затрат при вводе в эксплуатацию.

На основе анализа эпюры делается вывод о возможности участия потребителя в регулировании напряжения и достижения требуемых [1] результатов при условии выполнения требований ГОСТ сетевыми организациями в ТПЭ на разных сечениях.

Интерпретация рассмотренного порядка показана на примере электрических сетей АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» филиала «Амурские электрические сети» СП Восточные электрические сети (ВЭС). В качестве эквивалента выбраны сети всего СП, чтобы сохранить системные свойства. Структурный граф части эквивалента сети СП ВЭС показан на рис. 1.

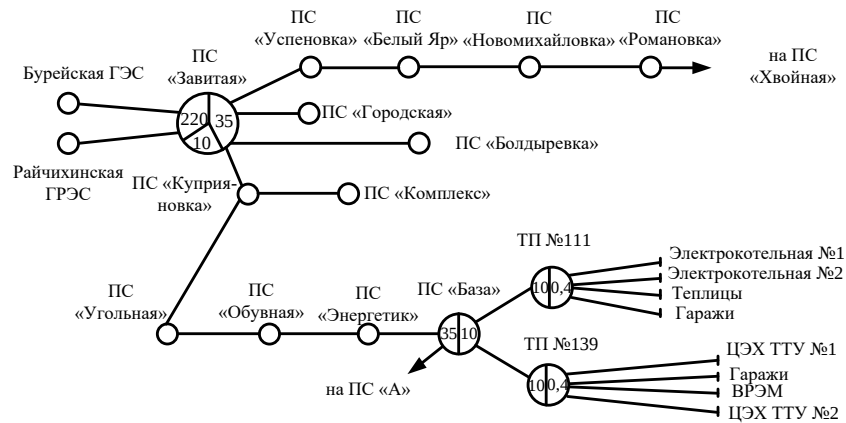


Рис. 1. Структурный граф части эквивалента сети СП ВЭС

Был произведен расчет режимов выделенного эквивалента. Результаты расчета режима по отклонению напряжения, а также схема части сети показаны на рис. 2. До введения ГОСТ [1] регулированием напряжения в сетях потребителей занималось АО «ДРСК» (результаты расчета режима по отклонению напряжения показаны на рис. 2 зеленым цветом). Также показаны результаты расчета режима и эпюра отклонения напряжения после введения ГОСТ 32144-2013 (черный, красный, синий цвета) при условии выполнения его требований сетевыми организациями.

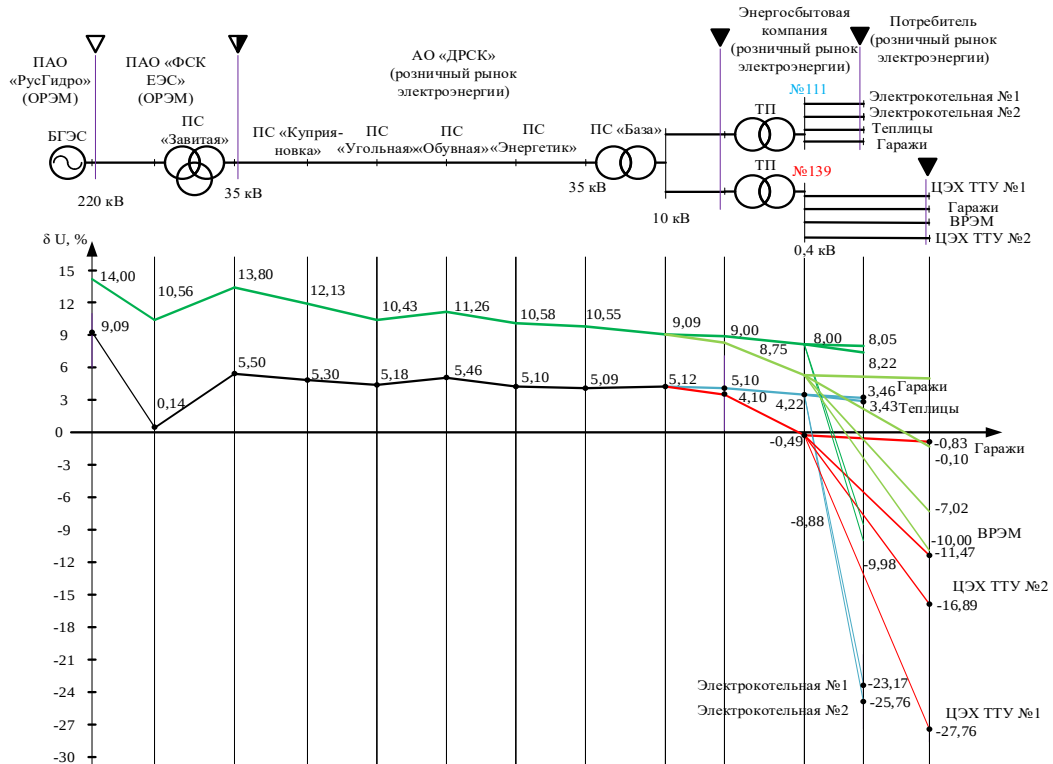


Рис. 2. Схема части сети и эпюра отклонения напряжения до регулирования

Символом ∇ указаны точки передачи электроэнергии от оптового участника рынка оптовому (ПАО «РусГидро» - ПАО «ФСК-ЕЭС»), символом ∇ – сечение оптовый – розничный рынок (ПАО «ФСК-ЕЭС» - АО «ДРСК»), ∇ – сечение розничный – розничный рынок (ДРСК-энергосбытовая организация, энергосбытовая организация-потребитель).

Ранее, до введения [1] выполнять требования соответствия стандарта по качеству электроэнергии требовалось только у потребителей, не было необходимости делать это в ТПЭ. Как известно, в сетях 110–220 кВ средства регулирования напряжения обеспечивают широкий диапазон его регулирования, требования ГОСТ легко выполнить [8, 9]. По ситуации, которая была до принятия [1], видно, что требования старого стандарта, в части отклонения напряжения у потребителей выполняются. При этом уровни напряжения в узлах сети определяются системным оператором исходя из требований надежности и пропускной способности, они выдерживаются также с точки зрения надежной работы изоляции. Такая ситуация подтверждается примером: традиционно на шинах 220 кВ филиала ПАО «РусГидро»-«Бурейская ГЭС» напряжение держится 248 кВ. Теперь, если энергоснабжающие, сетевые, энергосбытовые организации будут выполнять требования [1] в ТПЭ, то в точках передачи электроэнергии от сетевой компании к потребителю будут наблюдаться не допустимые уровни напряжения, которые могут привести, в том числе, к опрокидыванию асинхронных двигателей. Рассмотрим возможности потребителя для исключения этой ситуации.

По эпюре видно, что у потребителей электродвигательная №1 и электродвигательная №2, питающихся от ТП № 111, а также у потребителей ВРЭМ, цех ТТУ №1, цех ТТУ №2, питающихся от ТП № 139, напряжение не соответствует нормируемому [1] значению, т.е. $\pm 10\%$. Его необходимо отрегулировать традиционными способами.

Рассмотрим первый случай регулирования напряжения в сети – использование РПН и ПБВ. На трансформаторах ПС «Завитая» и «База» установлены максимальные отпайки РПН ($n=5$). Устройства ПБВ установлены на высокой стороне ТП № 111 и № 139, положение $+5\%$ (отпайка $n=5$). Закон встречного регулирования [8, 9] полагает совместное использование РПН и ПБВ. На рис. 3 показана эпюра отклонения напряжения после регулирования с помощью РПН и ПБВ.

При таком подходе, как видно из рис. 3, отклонение напряжения не соответствует [1] как у некоторых поставщиков электрической энергии, так и у некоторых потребителей в ТПЭ. Это характерно для большинства сетевых организаций.

Видим, что отклонение напряжения после регулирования у потребителей цех ТТУ №1, цех ТТУ №2 соответствует [1], но у большинства остальных выходит за нормируемые значения.

РСК, регулируя напряжение, может обеспечивать выполнение требований [1] в ТПЭ, но не обязана регулировать его дальше. Кроме того, участники рынков в каждом сечении дальше своих границ не видят значения ПКЭ. Из рис. 3 видно, что у большинства потребителей ГОСТ 32144-2013 не выполняется, но при этом РСК свою функцию выполняет. Отсюда следует, что в тексте договоров на электроснабжение необходимо указывать отпайки, на которых необходимо проводить регулирование напряжения распределительными сетевыми компаниями с целью выполнения требований [1] у большинства потребителей. Данный вид регулирования требует организационных и управленческих решений. Процесс управления качеством электроэнергии технически может быть осуществим, но даже при таком подходе обеспечить требуемое напряжение у всех потребителей невозможно. Требования ГОСТ [1] в ТПЭ не выполняются. Режим по напряжению для части потребителей не допустим.

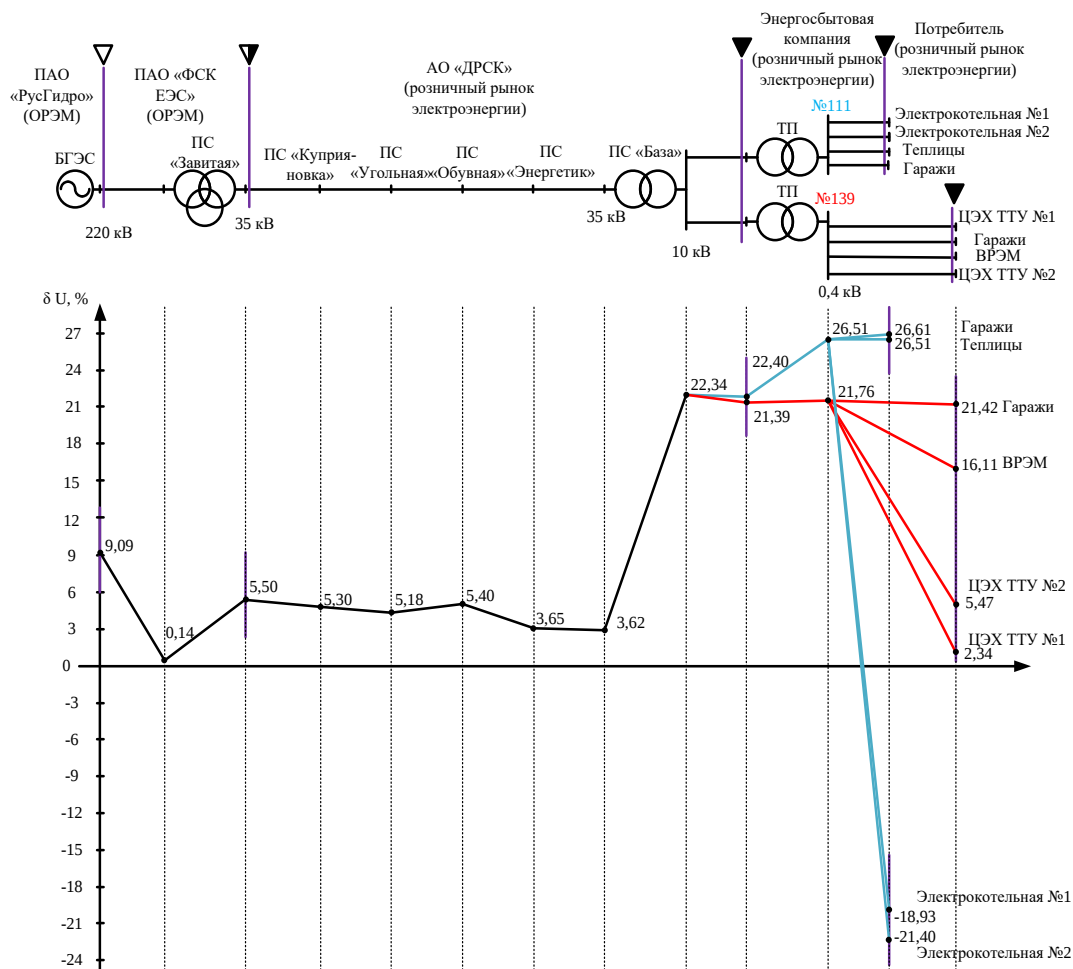


Рис. 3. Эпюра отклонения напряжения после регулирования РПН и ПБВ

Второй случай регулирования напряжения в сети: местное регулирование с использованием КУ. При установленных на трансформаторах ПС «Завитая» и «База» отпайках РПН и устройств ПБВ на ТП № 111 и № 139 подключим КУ к ПС «База» со стороны 10 кВ – зона РСК (рис. 4).

КУ позволяют обеспечить местное регулирование напряжения именно распределительными сетевыми комплексами (РСК). Однако в части компенсации реактивной мощности на сегодняшний день из нормативных документов действует только приказ¹ [10], по нему $\tan \phi$ установлены исходя из обеспечения требования надежности. Для того, чтобы РСК устанавливал КУ в ТПЭ, $\tan \phi$ должен быть не ниже приведенного в вышеуказанном приказе, в противном случае он их устанавливать не будет.

¹ Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 "О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии".

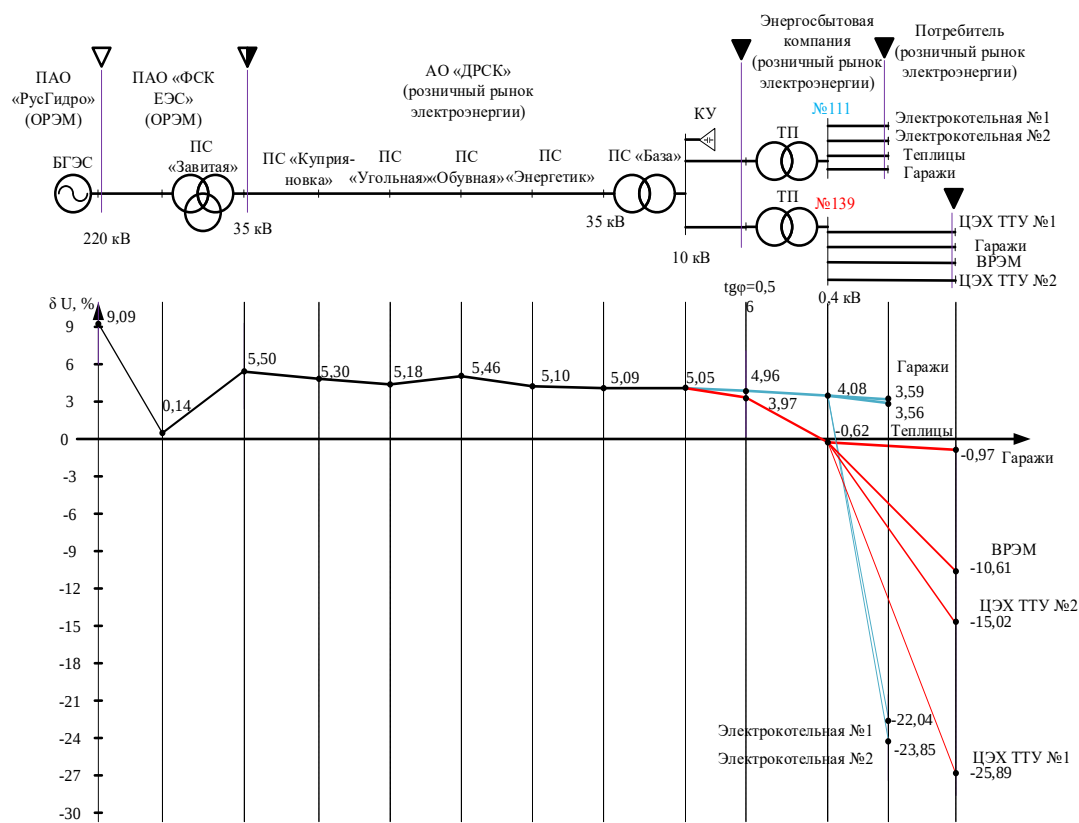


Рис. 4. Эпюра отклонения напряжения после установки КУ

Технически данный вид регулирования осуществим, но необходимо разработать регламентирующие документы для РСК, чтобы подключить их к процессу регулирования напряжения с помощью КУ, либо показать им экономическую выгоду от такого регулирования напряжения. Это обусловлено, в том числе, и стоимостью КУ. Так, средняя стоимость КУ напряжением 0,4 кВ мощностью 1200 кВар составляет 474 тыс. руб., а напряжением 10 кВ мощностью 1000 кВар – 247 тыс. руб.² [11]. Кроме того, централизованная установка одной КУ большей мощности дешевле, чем установка нескольких КУ той же суммарной мощности на стороне потребителей. Например, для десяти потребителей стоимость КУ 120 кВар обойдется в 528 тыс. руб., тогда как одна управляемая установка КУ 1200 кВар стоит 474 тыс. руб., что значительно дешевле. Кроме того, у РСК возможности регулирования напряжения более широкие. Однако в рассмотренном примере и во втором случае мы видим, что режим по напряжению для потребителей не допустим.

Третий случай регулирования напряжения в сети полагает использование ВДТ или ЛР. ВДТ (с максимально возможной отпайкой) установлен после ПС «База» 10 кВ. Из рис. 5 видно, что установка вольтодобавочного трансформатора решает вопрос регулирования напряжения у потребителей: цех ТТУ №1, гаражи, ВЭРМ, электрокотельная №1, теплица.

² Торговая электротехническая компания «Энергозапад»

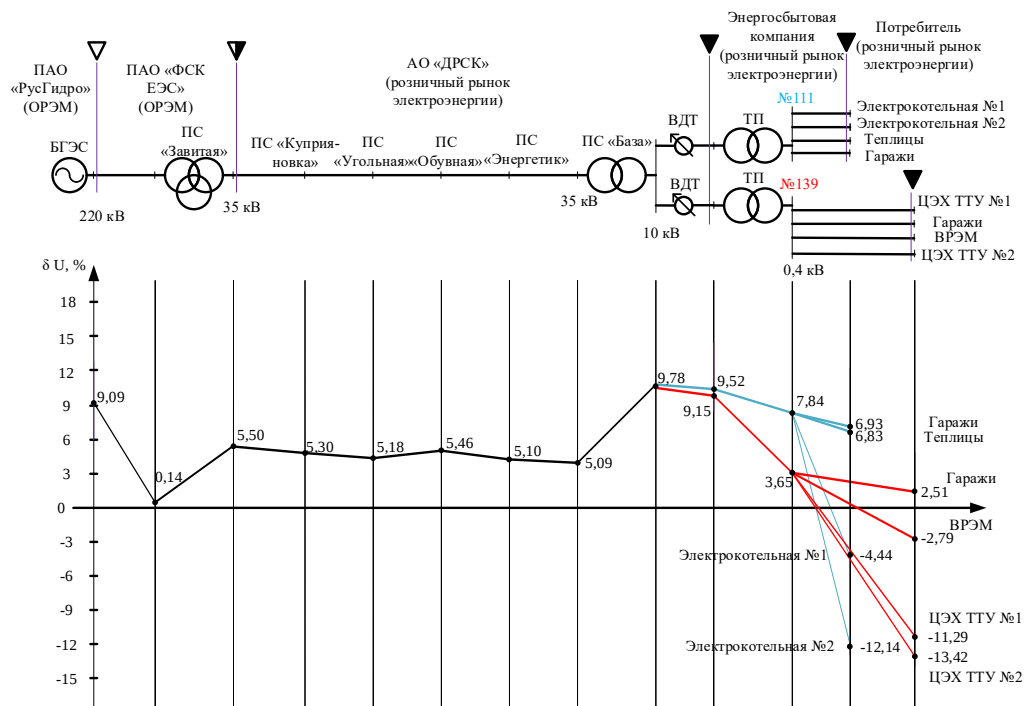


рис. 5. Эпюра отклонения напряжения после установки ВДТ

По техническим возможностям ВДТ может быть установлен на территории РСК, потребитель же установить его у себя не может. Стоимость вольтодобавочного трансформатора составляет от 700 до 1500 тыс. руб., что тоже не приемлемо для потребителя небольшой мощности³ [12]. Габариты ВДТ зависят от мощности, в среднем составляют 1000×600×1200 см. Таким образом, потребитель конструктивно и экономически не сможет использовать ВДТ. Поэтому в договора на энергоснабжение необходимо внести предложение об установке ВДТ для поддержания нормируемого напряжения в соответствии с [1] сетевыми распределительными комплексами в случае нерешения проблемы другими способами.

Из выше рассмотренных традиционных способов регулирования напряжения ни один не дает возможность обеспечения нормируемого КЭ на стороне всех потребителей без участия РСК сверх установленных в соответствии с [1] мер. Однако на сегодняшний день не разработаны нормативные документы по управлению КЭ, нет технических устройств такой мощности, которые потребитель мог бы реализовать для решения указанной проблемы.

Для участия потребителя в регулировании напряжения в своих электрических сетях можно применить тиристорный регулятор напряжения (ТРН) напряжением 0,4 кВ, обеспечивающий плавное изменение реактивной мощности от генерации до потребления. Принципиальная схема такого регулятора показана на рис. 6.

³ Производственная компания «Техэнергохолдинг».

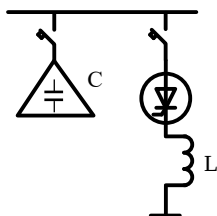


Рис. 6. Принципиальная схема тиристорного регулятора напряжения

Тиристорный регулятор напряжения подключен у потребителя электродвигательная №2, цех ТТУ №1, цех ТТУ №2, при совместной работе РПН на ПС «Завитая» и «База», устройств ПБВ на ТП № 111, № 139 и установленного ВДТ на ПС «База» 10 кВ. В данной ситуации напряжение на стороне потребителя стабилизируется и соответствует [1] (рис. 7).

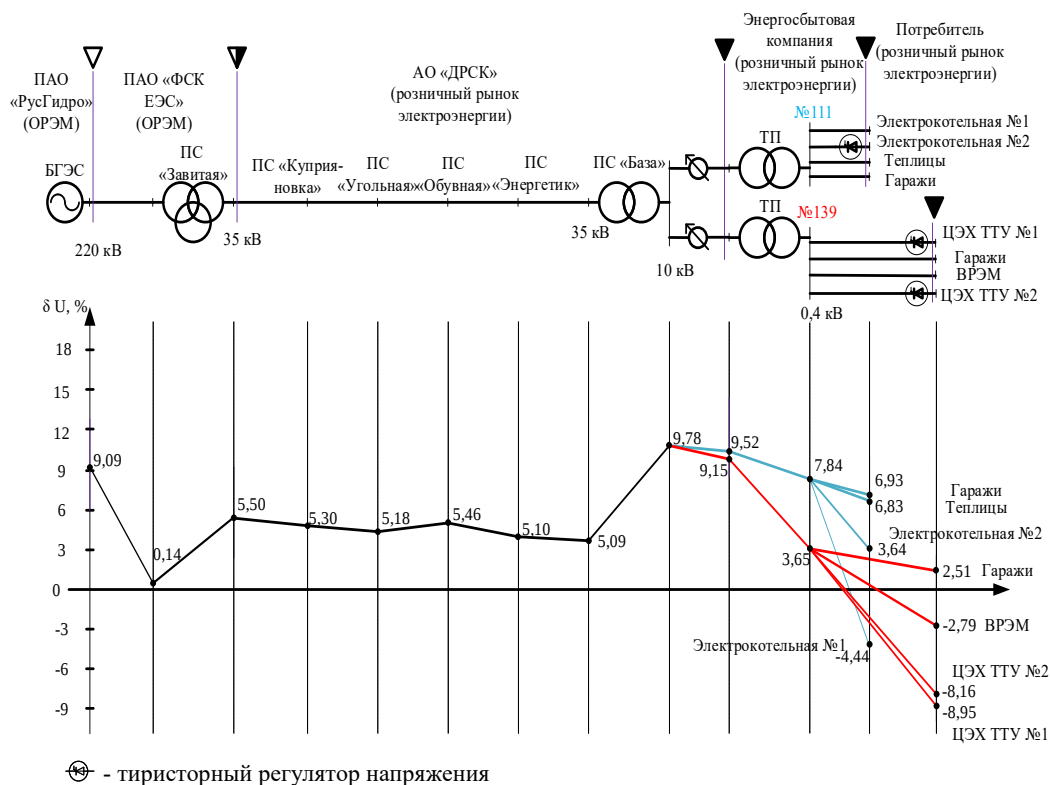


Рис. 7. Эпюра отклонения напряжения после установки ТРН

Как видно из рис. 7, применение такого регулятора обеспечивает требуемое напряжение у каждого потребителя. К сожалению, такие регуляторы на сегодняшний день в РФ не выпускаются, их разработки ведутся за рубежом⁴ [13]. Технически данный вид регулирования осуществим, если будут разработаны соответствующие нормативные документы, обязывающие участвовать в регулировании напряжения у потребителей как РСК, так и самих потребителей.

⁴ CD Automation – Industrial Automation.

Выводы

1. На основе характеристики оптовых и розничных рынков энергии и мощности выделены ТПЭ, в которых участники рынков обязаны выполнять требования ГОСТ 32144-2013, в том числе и по отклонению напряжения.
2. Рассмотрены возможности потребителей для обеспечения требуемого качества электроэнергии в части медленного изменения напряжения общеизвестными методами и способами.
3. На реальном примере показано, что потребитель без участия РСК в регулировании напряжения выполнять требования [1] не имеет технической возможности.
4. Разработаны рекомендации для решения проблемы регулирования напряжения у потребителя.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. Бедретдинов Р.Ш. Исследование влияния тиристорного регулятора напряжения и мощности на качество электроснабжения низковольтных потребителей / Автореф. дис. ... канд. техн. наук Нижний Новгород.: Типография НГТУ, 2016. 20 с. URL: <http://docme.ru/doc/1418442/issledovanie-vliyaniya-tiristorogo-regulyatora-napryazheniya-i...> (дата обращения 23.03.2018).
3. Федеральный закон «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ. 2016.
4. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» № 1172. 2010.
5. Постановление Правительства Российской Федерации «О функционировании розничных рынков электрической энергии» № 442. 2012. (ред. 17.05.2016).
6. Управление качеством электроэнергии [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.И. Карташев [и др.]. Электрон. текстовые данные. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 347 с. 978-5-383-01074-7. URL: <http://www.iprbookshop.ru/65643.html> (дата обращения 20.03.2018).
7. ГОСТ 33073-2014 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 2015. 45 с.
8. Правила устройств электроустановок (ПУЭ). Изд. седьмое. М.: Норматика, 2016. 464 с.
9. Шаров Ю.В., Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Управление качеством электрической энергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.
10. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 "О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии". URL: <http://base.garant.ru/71146780/#ixzz4ShXo1PIP> (дата обращения 23.03.2018).
11. Торговая электротехническая компания «Энергозапад». URL: <http://energozapad.ru/kompensatory-reaktivnoy-moschnosti> (дата обращения 23.03.2018).
12. Производственная компания «Техэнергохолдинг». URL: http://www.tehenergoholding.ru/index.php?menu_id=84&menu_parent_id=83&yclid=755260750374607811 (дата обращения 23.03.2018).
13. CD Automation – Industrial Automation. URL: <https://www.cdautomation.com/> (дата обращения 23.03.2018).

Авторы публикации

Савина Наталья Викторовна – д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе Амурского государственного университета (АМГУ). E-mail: nataly-savina@mail.ru.

Бодруг Наталья Сергеевна – старший преподаватель кафедры энергетики Амурского государственного университета (АМГУ). E-mail: bodrug82@rambler.ru.

References

1. GOST 32144-2013 Electric energy. Compatibility of technical means electromagnetic. Standards of quality of electric energy in systems of power supply of general purpose. M.: Publishing house of standards, 2014. 20 p.
2. Bedretdinov R.S. Investigation of the effect of the thyristor voltage regulator and power quality of power supply low-voltage consumers / the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences Nizhny Novgorod.: Printing house of the NSTU, 2016. 20 p. URL: <http://docme.ru/doc/1418442/issledovanie-vliyaniya-tiristornogo-regulyatora-napryazheniya-i...> (accessed 23.03.2018).
3. Federal law "About Power Industry" No. 35-FZ. 2016.
4. The resolution of the Government of the Russian Federation "About the approval of Rules of the wholesale market of electric energy and power and about introduction of amendments to some acts of the Government of the Russian Federation concerning the organization of functioning of the wholesale market of electric energy and power" No. 1172. 2010.
5. The resolution of the Government of the Russian Federation "About functioning of the retail markets of electric energy" No. 4422012.
6. Power Quality Management [Electronic resource]: a tutorial / I.I. Kartashev [and others]. - Electron. text data. M.: Publishing house MPEI, 2017. 347 c. 978-5-383-01074-7. URL: <http://www.iprbookshop.ru/65643.html> (circulation date is 03/20/2018).
7. GOST 33073-2014. Electric energy. Compatibility of technical means electromagnetic. Control and monitoring of quality of electric energy in systems of power supply of general purpose. M.: Publishing house of standards, 2015. 45 p.
8. Rule of Devices of Electroinstallations (RDE). Edition seventh. M.: Normatica, 2016. 464 p.
9. Sharov Yu.V., Kartashev I.I., Tulsy V.N., Shamonov R.G. Quality management of electric energy. M.: MEI publishing house, 2006. 320 p.
10. The Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of June 23, 2015 N 380 "About the Procedure of payments of values of a ratio of consumption of active and jet power for the separate power accepting devices (groups of the power accepting devices) of consumers of electric energy". URL: <http://base.garant.ru/71146780/#ixzz4ShXo1PIP> (circulation date is 23.03.2018).
11. Trading electrotechnical company "Energozapad". URL: <http://energozapad.ru/kompensatory-reaktivnoy-moschnosti> (circulation date is 23.03.2018).
12. Tekhenergoholding production company. URL: http://www.tehenergoholding.ru/index.php?menu_id=84&menu_parent_id=83&yclid=7552607503746078114 (circulation date is 23.03.2018).
13. CD Automation – Industrial Automation. URL: <https://www.cdautomation.com/> (circulation date is 23.03.2018).

Authors of the publication

Natalia V. Savina – Grand PhD in Engineering, Professor Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation. E-mail: nataly-savina@mail.ru.

© *Н.В. Савина, Н.С. Бодруг*

Natalia S. Bodrug – senior lecturer Amur State University, Blagoveshchensk, Russian Federation. E-mail: bodrug82@rambler.ru.

Поступила в редакцию

07 августа 2018 г.



КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ АСУТП ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

А.Н. Васев, Р. Ш. Мисбахов, А. И. Зиганшина, В. В. Федотов

Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

digital-laboratory@mail.ru

Резюме: в статье рассматривается экономичный способ развертывания систем диагностического мониторинга высоковольтных электроустановок за счет совместного использования каналов связи пассивных волоконно-оптических систем сбора и передачи информации (ССПИ) АСУТП и систем передачи диагностической информации (СПДИ) устанавливаемых систем непрерывной технической диагностики. Использование существующих ССПИ и коммуникационного оборудования АСУТП для систем диагностического мониторинга повысит экономическую эффективность и расширит область применения систем непрерывной диагностики, в том числе в самых распространенных электрических сетях – городских и пригородных сетях, а также в сетях электроснабжения промышленных предприятий среднего напряжения.

Ключевые слова: непрерывная техническая диагностика, система сбора и передачи информации, система передачи диагностической информации, пассивная оптическая сеть, xPON, GPON, волоконно-оптические каналы связи, АСУТП, волоконные брэгговские решетки.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26.

Для цитирования: Васев А.Н., Мисбахов Р.Ш., Зиганшина А.И., Федотов В.В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 16-26. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26.

COMBINE COMMUNICATIONS OPTICAL NETWORK OF SCADA OF ELECTRIC POWER STATION AND SUBSTATION

A.N. Vasev, R.Sh. Misbakhov, A.I. Ziganshina, V.V. Fedotov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

digital-laboratory@mail.ru

Abstract: the article discusses an economical way to deploy diagnostic monitoring systems for high-voltage electrical units through a combination of passive fiber-optic systems for collecting and transmitting technological information of SCADA with diagnostic information transmission systems of systems for continuous technical diagnostics in them. The usage of existing communication network of SCADA will increase economy and expand the scope of continuous

diagnostic systems.

Keywords: on-line technical diagnostics, SCADA, transmission of diagnostic information, passive optical network (xPON), GPON, optical data links, digital substation.

For citation: A.N. Vasev, R.Sh. Misbakhov, A.I. Ziganshina, V.V. Fedotov. Combine communications optical network of scada of electric power station and substation. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 16-26. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26.

Введение

Энергетика – важнейшая отрасль экономики. Развитие энергетики, состояние её основных производственных фондов существенно влияют на качество жизни и деятельность общества, на конкурентоспособность и рост промышленности, а также на безопасность государства. В 2016 г. выработка электроэнергии электростанциями России, включая производство электроэнергии на электростанциях промышленных предприятий, составила 1071,8 млрд. кВт·ч (по ЕЭС России – 1048,5 млрд кВт·ч). В результате Россия сегодня занимает четвертое место в мире по объему выработки электроэнергии [1].

Анализ текущего состояния объектов электросетевого комплекса страны показывает, что на 2016 г. состояние ЕНЭС характеризуется следующим объемом оборудования со сверхнормативным сроком службы: 59% для ПС (более 25 лет) и 49% для ЛЭП – 18%.

Состояние воздушных линий Единой национальной электрической сети на 01.01.2015 г. характеризовалось следующим соотношением (по протяженности):

- «рабочее» состояние – 42%;
- «ухудшенное» состояние – 56%;
- «предаварийное» состояние – 2%.

Общая доля технологических нарушений в электросетевом комплексе по причинам, связанным со старением (износом) оборудования, по итогам 2015 года составила 24%.

Для продления сроков службы дорогостоящего высоковольтного электрооборудования и повышения надежности сети в целом необходимо внедрять системы и устройства технической диагностики и непрерывного мониторинга состояния оборудования [2]. Техническая диагностика в режиме реального времени позволяет оперативно обнаружить повреждения и дефекты рабочих частей электрооборудования на начальных этапах развития и предотвращать возникновение аварийных ситуаций. Однако внедрение систем непрерывной технической диагностики и мониторинга сегодня является дорогостоящим мероприятием, особенно для самых распространённых в городских, пригородных и промышленных электрических сетях электроустановок (ЭУ) среднего напряжения (СН). Также актуальной задачей, в связи со сложностью и дороговизной мероприятий по соблюдению требований электромагнитной совместимости в ЭУ при применении «медных» каналов связи в системах сбора и передачи информации (ССПИ) в автоматизированных системах управления технологическим процессом в электроэнергетике, а также снижением стоимости волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), является переход в ССПИ к использованию оптических каналов связи. При этом, в связи со значительной стоимостью активного оптического оборудования, монтажных и пуско-наладочных работ при его установке, применение ВОЛС ограничено ЭУ высоких классов напряжения. Альтернативой традиционным способам развертывания оптических сетей со множеством оптических коммутаторов в ССПИ являются находящие широкое применение в телекоммуникационной сфере технологии и оборудование пассивных оптических сетей (ПОС). Основным преимуществом технологий ПОС является древовидная

топология с одним ведущим оптическим коммутатором (*OLT*) и множеством экономичных оптических разветвителей (сплиттеров) в узлах сети, позволяющая снизить число и длину ВОЛС, соединяющие контроллеры присоединений АСУТП со встроенным терминальным модулем ПОС (*SFP ONT*) без установки промежуточных оптических коммутаторов, что, в свою очередь, позволяет снизить капитальные и операционные затраты в 2–3 раза по сравнению с традиционными решениями.

Надежность и качество электроснабжения потребителей

Уровень надежности электрических систем зависит от частоты и длительности перерывов электроснабжения, которые зависят от технического состояния электрооборудования на электрических станциях и подстанциях [3]. Уровень надежности можно повысить, в первую очередь, уменьшением частоты перерывов электроснабжения и отключений.

Одним из самых действенных путей уменьшения частоты отключений и надежного функционирования электросетевого комплекса является внедрение и широкое применение устройств, систем и мероприятий по технической диагностике. Техническая диагностика позволяет оперативно и своевременно обнаружить повреждения и дефекты, в том числе без отключения электроустановки, а также устранить их с целью предотвращения аварийных и ненормальных ситуаций [4]. Такие системы позволят своевременно и с большей вероятностью, чем традиционные виды диагностики (плановые мероприятия по ремонту) обнаружить повреждения, предотвратить аварийные ситуации, оперативно реагировать на изменение технического состояния эксплуатируемого оборудования, исключить «человеческий фактор» [5].

Согласно «Положению ОАО «Россети» о технической политике в электросетевом комплексе» [5] одним из факторов формирования интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (Концепция ИЭС ААС) является оснащение подстанций различными системами и подсистемами автоматизированного контроля процессов, происходящих в электроустановках. Одним из приоритетов данной программы является переход на *непрерывную диагностику динамических свойств электрооборудования в режиме реального времени* с использованием современных технических средств обработки и передачи информации. Интеграция с интеллектуальными сетями возможна при совмещении систем непрерывной диагностики с системами сбора и передачи информации в сетях «*Smart Grid*» [7].

Применение систем технической диагностики, прежде всего электросетевыми компаниями, позволяет обеспечить:

- снижение или исключение экономических потерь (минимизация упущенных выгод)
- увеличение времени полезного использования и объема полезного отпуска электроэнергии потребителям;
- снижение длительности отключений потребителей и частоты таких отключений;
- предотвращение аварийных ситуаций (исключение и снижение частоты аварий, связанных с утратой основного оборудования подстанций);
- уменьшение показателей *SAIDI* и *SAIFI* [6].

Традиционно система непрерывного диагностического мониторинга состоит из трех уровней: первичные и измерительные датчики, блок мониторинга и обработки сигналов, средства отображения состояния контролируемых параметров. Связь между уровнями выполняется посредством цифровых каналов с использованием медных, волоконно-оптических или беспроводных каналов связи. Но высокая стоимость каналов связи может оказаться существенным препятствием для развертывания полноценной системы непрерывной диагностики. Поэтому использование уже имеющихся на энергообъекте каналов связи и коммуникационного оборудования АСУТП для развертывания систем

непрерывной технической диагностики оборудования позволит снизить стоимость и расширить сферу применения систем диагностики в режиме реального времени.

Экономическая эффективность при комбинированной работе систем передачи диагностической информации (СПДИ) и ССПИ АСУТП станций и подстанций достигается за счет:

- экономии капитальных затрат на оборудование и СМР и ПНР при развертывании систем передачи диагностической информации;
- экономии операционных затрат на обслуживание и обучение персонала;
- экономии времени развертывания СПДИ и ССПИ.

Применение оптических каналов связи в ССПИ АСУТП

Характерной особенностью существующих информационно-телекоммуникационных систем информационного обмена в электроэнергетике является их разделение на подсистемы связи различного назначения (технологической телефонной связи, оперативно-диспетчерской связи, передачи технологической информации, телемеханики и АИИСКУЭ). С развитием новых технологий и их удешевления все большее распространение в электроэнергетике получили цифровые оптические коммутаторы, которые в качестве среды передачи используют волоконно-оптический кабель (ВОК).

При этом, в настоящее время активно развиваются и получают распространение технологии пассивных оптических сетей, использующие в качестве среды передачи информации оптические каналы связи, с пассивными оптическими разветвителями (сплиттерами) в узлах сети, которые позволяют организовывать экономически выгодную сеть с топологией типа «древовидная звезда» посредством ВОЛС (технология *PON (passive optical network)*). При этом технология *PON* обладает необходимой эффективностью наращивания узлов сети и пропускной способностью, что является важным в технологических сетях (АСУТП) на объектах электроэнергетики.

Технологии пассивных оптических сетей позволяют обеспечить снижение капитальных вложений и издержек при проектировании, построении и обслуживании систем сбора и передачи информации (ССПИ) для современных систем автоматизации объектов энергокомпаний (АСКУЭ, АСУТП, мониторинг РЗА и ПА, системы ТМ) [8].

Главными преимуществами при развертывании *PON* являются:

- пассивные узлы в сети, вместо активных;
- существенное сокращение ВОЛС и занимаемого пространства при прокладке в ЭУ;
- снижение затрат на эксплуатацию сети, в частности, снижение расходов на электропитание в силу отсутствия активного оборудования в телекоммуникационной сети, а также расходов на техническое обслуживание и ремонт благодаря значительному уменьшению количества коммутационного оборудования и кабелей в сети, а также встроенными средствами самодиагностики, администрирования и обслуживания.

При развертывании подстанционной сети на базе технологии *GPON*, *OLT* размещается в шкафах связи в распределительных устройствах среднего напряжения или в стойке телемеханики зала телемеханики, релейной защиты и автоматизации общеподстанционного пункта управления подстанцией высокого напряжения, и соединяется посредством оптического одномодового волокна с *ONT*, например, в ячейках КРУ, присоединенных к информационным интерфейсам УСО, РЗА, счетчиков электроэнергии и т.п.

Разделение нисходящего и восходящего потока трафика при использовании одного оптоволокна осуществляется путем выделения одной длины волны для передачи восходящего потока и одной длины волны для передачи нисходящего потока трафика (технология *WDMA (Wavelength Division Multiple Access)* с разделением каналов по длине волны): *ONT* передает на длине волны 1310 нм, *OLT* – 1490 нм [9].

В качестве комбинированной системы на подстанции среднего напряжения в данной статье рассматривается совмещение ССПИ с системой СПДИ для передачи информации о температуре токоведущих элементов, вспышек света при частичных и коронных разрядах на высоковольтном электрооборудовании, уровня влажности и т.д.

Волоконно-оптические многосенсорные системы

На сегодняшний день одним из применений волоконно-оптических технологий для измерительных целей в промышленности являются волоконно-оптические многосенсорные системы (ВОМСС) [10]. К ВОМСС относят квази-распределенные сенсорные сети, построенные на базе волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР). Одним из главных преимуществ ВБР является уникальный способ преобразования измеряемой величины в изменение длины волны излучения, проходящего через решётку и/или отражаемого от неё, а также простота изготовления [11]. ВБР зарекомендовали себя и получили распространение в строительстве, нефтедобыче, энергетике, аэрокосмической технике и др. Широкому применению в различных областях способствует множество факторов: миниатюрность – отдельные разработки имеют внешний диаметр рабочей части менее 100 мкм, что позволяет использовать их в труднодоступных местах без существенных конструктивных доработок устройств, в составе которых они работают; мультипликативность отклика на параметры внешней среды – температуру, влажность, механические воздействия и др.; отсутствие влияния электромагнитных помех, сохранение работоспособности, при наличии различных покрытий при температурах от 100 до 300° и пр.

Одним из актуальных направлений применения ВБР является электроэнергетика, в частности, в составе систем диагностического мониторинга ЭО в ЭУ различных классов напряжения: контактов, токоведущих элементов, болтовых соединений в трансформаторных подстанциях и распределительных пунктах СН (ТП и РП), в комплектных распределительных устройствах СН (КРУ), обмоток и масла силовых трансформаторов, аккумуляторных источников питания и др.

Несмотря на множество преимуществ, получаемых при использовании ВОМСС на базе ВБР в системах диагностического мониторинга ЭУ, следует отметить проблемы, связанные с дороговизной, высокой сложностью и временем прокладки отдельной сети волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для ВОД, как на уже существующих, так и на строящихся энергообъектах, а также на обслуживание ВОМСС на базе ВБР. Одним из путей решения проблем высоких затрат является реализация подсистемы ВОМСС в составе ССПИ на базе ПОС, разворачиваемой для нужд АСУТП в ЭУ.

Согласно результатам проведенных исследований, в рамках диссертаций [10, 11], были сделаны выводы об успешности применения ВБР для измерения температуры токоведущих элементов. По результатам измерений смещения спектра проходящего через сенсоры оптического сигнала на длине волны 1550 нм, с высокой точностью определяется температура (в соответствии с заранее измеренной зависимостью смещения от температуры). РП 6–35 кВ являются важным элементом систем электроснабжения промышленных предприятий и распределительных электрических сетей среднего напряжения, обеспечивающим непосредственное электропитание высоковольтных потребителей электроэнергии. Это делает перспективным и обеспечивает массовость внедрения в их структуру ВОМСС многоточечного (контроль болтовых соединений, узлов коммутационного аппарата и т.д.) и квази-распределенного типа (контроль токоведущих линий, шин и т.д.).

Архитектура ВОМСС в составе ССПИ на базе технологии GPON

Для реализации ВОМСС в составе ССПИ на базе технологии GPON может быть использовано несколько вариантов структуры системы [12], конфигурация которой зависит

от конструкции волоконно-оптического датчика (ВОД). Конструкция ВОД имеет две разновидности: в виде щупа (рис. 1, а) и в виде кольцевого наконечника (рис. 1, б).

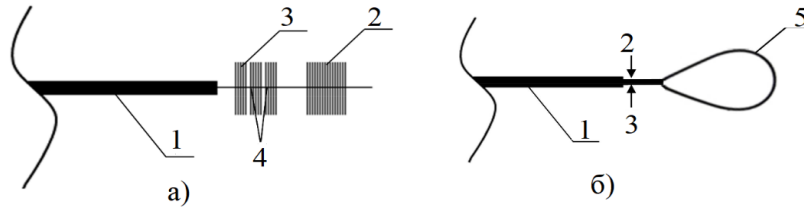


Рис. 1. Конструкция ВОД

1 – световод; 2 – первая ВБР с торца световода; 3 – волоконная решетка Брэгга с двумя фазовыми сдвигами; 4, 5 – петля [12]

На рис. 2 показан вариант реализации совместной работы BOMCC с датчиками в виде концевого щупа в составе ССПИ на базе технологии GPON.

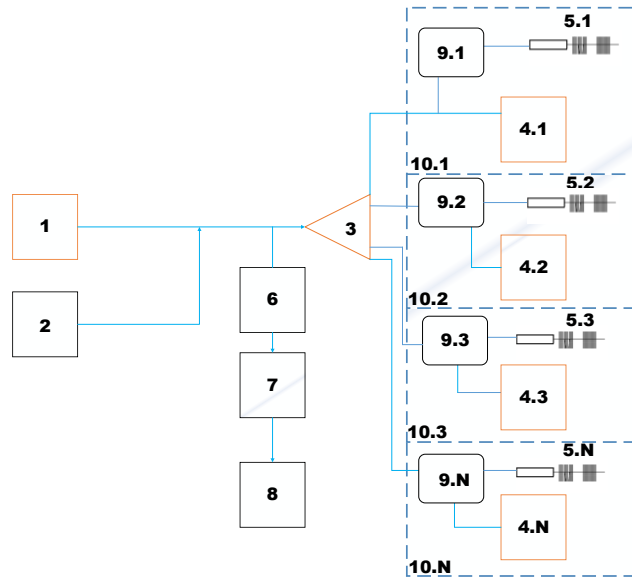


Рис. 2. Структурная схема BOMCC с датчиками в виде концевого щупа в составе ССПИ на базе технологии GPON: 1 – GPON OLT LTP-4X; 2 – интеррогатор; 3 – оптический сплиттер; 4.1...4.N – контроллер присоединения ЭНИП-2 с поддержкой GPON; 5.1...5.N – ВОД в виде концевого щупа; 6 – оптический фильтр; 7 – фотоприемник; 8 – контроллер; 9.1...9.N – оптические разветвители; 10.1...10.N – ячейки КРУ 6–35 кВ

Предлагаемая архитектура имеет древовидную топологию, элементы 1, 2, 3, 6, 7, 8 которой располагаются в шкафу АСУ, элементы 4.1...4.N, 5.1...5.N располагаются в шкафах КРУ, в отсеке РЗА и на контактных соединениях соответственно.

Преимущества данной архитектуры заключаются в следующем:

- существенная экономия оптического волокна и оптических сплиттеров (по одному на каждое ответвление);
- сокращение сроков при прокладывании оптических кабелей.

Недостатки:

- вероятность влияния отраженного сигнала интеррогатора на каналы передачи данных в восходящем направлении.

На рис. 3 показан вариант реализации совместной работы ВОМСС с датчиками в виде кольцевого наконечника в составе ССПИ на базе технологии GPON.

Предлагаемая архитектура имеет древовидную топологию, элементы 1, 2, 3, 8, 9, 10 которой располагаются в шкафе АСУ, элементы 4.1...4.N, 5.1...5.N, 6.1...6.N, 7.1...7.N располагаются в шкафах КРУ, в отсеке РЗА и на токоведущих частях оборудования соответственно.

Преимущества данной архитектуры заключаются в следующем:

- упрощение работ при организации распределенного мониторинга токоведущих частей оборудования;
- снижение влияния ВОМСС на ССПИ на каналы передачи данных в восходящем направлении;
- возможность создания измерительных каскадов на участках 6.1...6.N.

Недостатки:

- увеличенный расход оптического кабеля;
- усложнение монтажа в силу наличия большого количества ветвлений оптического кабеля.

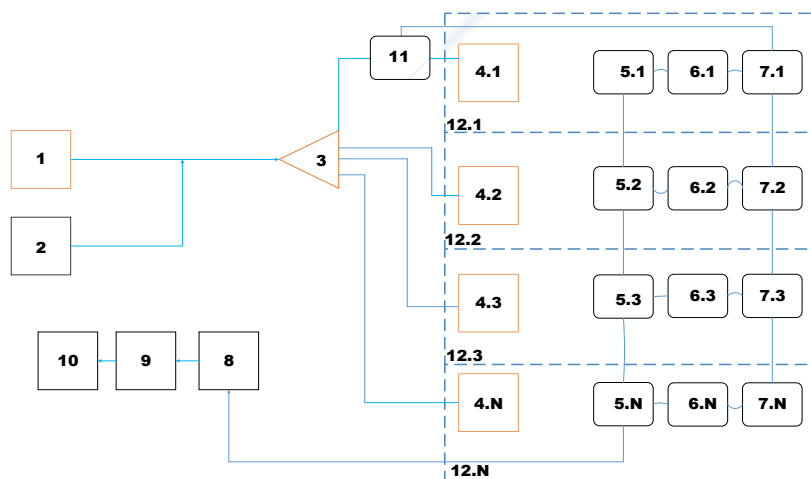


Рис. 3. Структурная схема ВОМСС с датчиками в виде концевой щупа в составе ССПИ на базе технологии GPON: 1 – GPON OLT LTP-4X; 2 – интеррогатор; 3 – оптический сплиттер; 4.1...4.N – контроллер присоединения ЭНИП-2 с поддержкой GPON; 5.1...5.N – оптический объединитель; 6.1...6.N – ВОД в виде кольцевого наконечника; 7.1...7.N – оптический разветвитель; 8 – оптический фильтр; 9 – фотоприемник; 10 – контроллер; 11 – главный оптический разветвитель; 12.1...12.N – ячейки КРУ 6-35 кВ

На рис. 4 показана амплитудно-частотная характеристика совместной работы ВОМСС на базе ВБР с одним сенсором и ССПИ на базе технологии GPON.



Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика совместной работы BOMCC на базе ВБР с одним сенсором и ССПИ на базе технологии GPON

Внедрение ССПИ на базе технологии GPON на объектах электроэнергетики

В качестве первого этапа внедрения комбинированных систем в электроустановках электросетевой компании была развернута опытная пассивная внутриобъектовая система связи на базе технологии GPON на подстанции «Центр» Набережночелнинских электрических сетей – филиал ОАО «Сетевая компания». Для этого, совместно со специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» (г. Архангельск), был разработан контроллер присоединения ССПИ с интегрированным модулем SFP ONU GPON – так называемый преобразователь измерительный многофункциональный ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON.

На сегодняшний день ССПИ на базе технологии GPON успешно функционирует на указанном объекте более года. Все заложенные на этапе проектирования характеристики по надежности, электромагнитной совместимости и производительности системы подтвердились. Смонтированный в релейном отсеке ячейки КРУ ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON показан на рис. 5.



Рис. 5. Многофункциональный измерительный преобразователь ЭНИП-2 с поддержкой технологии GPON

Выводы

В данной статье предложена и рассмотрена возможность построения комбинированной системы ССПИ и СПДИ, позволяющая снизить капитальные и операционные затраты на развертывание АСУТП и системы диагностического мониторинга высоковольтного электрооборудования в электроустановках различных классов напряжения.

Экономическая эффективность при комбинированной работе систем передачи диагностической информации (СПДИ) и ССПИ АСУТП станций и подстанций достигается за счет:

- экономии капитальных затрат на оборудование и СМР и ПНР при развертывании систем передачи диагностической информации;
- экономии операционных затрат на обслуживание и обучение персонала;
- экономии времени развертывания СПДИ и ССПИ.

При реализации предлагаемого решения задачи систему непрерывной диагностики оборудования можно интегрировать с интеллектуальными сетями *Smart Grid*, что уменьшит срок окупаемости системы.

На первом этапе реализации комбинированных систем в электроустановках электросетевой компании была создана опытная пассивная внутриобъектовая система связи на технологии *GPON* на подстанции «Центр» Набережночелнинских электрических сетей – филиал ОАО «Сетевая компания». Контроллер присоединения ССПИ с интегрированным *SFP-ONU-GPON* модулем был разработан совместно со специалистами ООО «Инженерный центр» «Энергосервис». В дальнейшем планируется разработка и запуск пилотного проекта реализации полноценной комбинированной ВОМСС в составе ССПИ на базе технологии *GPON*.

Заключение

Одним из основных способов увеличения показателей надежности систем электроснабжения является применение систем непрерывной технической диагностики высоковольтного электрооборудования. Но высокая их стоимость является препятствием для реализации полноценной системы непрерывной диагностики в электроустановках, особенно в электроустановках среднего класса напряжения. Для решения данной проблемы предлагается использовать ВОМСС в составе ССПИ на базе пассивных оптических сетей. На основании предварительного анализа можно сделать вывод о возможности взаимной интеграции ССПИ первого уровня и ВОМСС на базе квази-распределенных датчиков ВБР различного назначения (измерение температуры, влажности, механических напряжений). Одним из ключевых аспектов внедрения подобной системы является её экономическая эффективность.

Данное решение позволит значительно расширить сферу применения систем непрерывной технической диагностики, кроме этого, пассивные оптические сети с оптическими разветвителями (сплиттерами) позволят организовать экономичные и скоростные внутриподстанционные пассивные оптические каналы связи для передачи и обмена информацией, в том числе с терминалов РЗА, АСУТП и АСКУЭ.

Литература

1. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (протокол от 22.02.2017 № 252).
2. Дарьян Л., Образцов Р., Ильина Е Сипачев К. Автоматизированная система мониторинга диагностики оборудования подстанции // Электроэнергия: передача и распределение. №1. 2015.
3. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии / пер. с англ. Рабодзея А.Н. М.: Додека-XXI, 2010. 336 с.: ил.
4. Непомнящий В.А. Оптимизация распределения надежности по иерархическим уровням системы электроснабжения. // Надежность и безопасность энергетики. 2011. № 1, 2.
5. Джакупова К.А. Диагностика и мониторинг электрооборудования подстанции // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: Материалы IV российской молодежной научной школы-конференции, 1–3 ноября 2016 г., Томск. в 2 т. Т. 2 /

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). Томск: ЦРУ, 2016. С. 273–274.

6. Мониторинг показателей надежности распределительных сетей ОАО «Сетевая компания» [Электронный ресурс]. URL: <http://cet.tatarstan.ru>. (Дата обращения: 15.03.2017).

7. Лифшиц А.М. «Переход к Smart Grid и цифровым подстанциям. Гибридный вариант построения сети связи и передачи данных» // Технические и программные средства систем автоматизации. №4. 2013.

8. Лизунов И.Н., Васев А.Н., Мисбахов Р.Ш., Федотов В.В., Хузиахметова Э.А. Технологии передачи данных в современных системах релейной защиты и автоматики и их показатели качества // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19, №1-2. С.52–63. DOI:10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-52-63.

9. Иванов В.И. Применение технологии WDM в современных сетях передачи информации. Казань, 2010. 148с.

10. Мисбахов Р.Ш. Волоконно-оптическая многосенсорная система для контроля температуры коммутационных и токоведущих элементов энергетических объектов на основе брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми сдвигами: дис.... канд. техн. наук: Казань, 2017. 174с.

11. Денисенко П.Е. Волоконно-оптические брэгговские датчики со специальной формой спектра для систем климатических испытаний: дис.... канд. техн. наук. 177с.

12. Мисбахов Р.Ш. Волоконно-оптическая многосенсорная система для контроля температуры коммутационных и токоведущих элементов энергетических объектов на основе брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми сдвигами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Мисбахов Рустем Шаукатович. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ). Казань, 2017. 30с.

Авторы публикации

Васев Алексей Николаевич – начальник ССДТУ филиала ОАО «Сетевая Компания» Набережночелнинские электрические сети. Email: argentums@mail.ru.

Мисбахов Ринат Шаукатович – канд. техн. наук, директор ИЦ "Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения" Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: zerdex@bk.ru.

Зиганишина Айсылу Ильясовна – инженер НИЛ «ЦСИСЭ» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: ais-94@mail.ru.

Федотов Владислав Валентинович – инженер НИЛ «ЦСИСЭ» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: vladislavfedotov1408@gmail.com.

References

1. Polozhenie PAO «Rosseti» «O edinoj tekhnicheskoy politike v ehlektrosetevom komplekse» (protokol ot 22.02.2017 № 252).

2. Dar'yan L., Obrazcov R., Il'ina E., Sipachev K. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa diagnostiki oborudovaniya podstancii // EHlektroehnergiya: peredacha i raspredelenie. №1. 2015.

3. Kusko A., Tompson M. Seti ehlektrosnabzheniya. Metody i sredstva obespecheniya kachestva ehnergii / per. s angl. Rabodzeya A.N. M.: Dodeka-HKH1. 2010. 336 s.: il.

4. Nepomnyashchij V.A. Optimizaciya raspredeleniya nadezhnosti po ierarhicheskim urovnjam sistemy ehlektrosnabzheniya. // Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki. 2011. № 1, 2.

5. Dzhakupova K.A. Diagnostika i monitoring ehlektrooborudovaniya podstancii // EHnergetika,

ehlektromekhanika i ehnergoehffektivnye tekhnologii glazami molodezhi: Materialy IV rossijskoj molodezhnoj nauchnoj shkoly-konferencii. 1–3 noyabrya 2016 g., Tomsk: v 2 t. T. 2 / Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politekhnicheskij universitet (TPU). Tomsk: CRU, 2016. S. 273–274.

6. Monitoring pokazatelej nadezhnosti raspreditel'nyh setej OAO «Setevaya kompaniya».[EHlektronnyj resurs]. URL: <http://cet.tatarstan.ru>. (Data obrashcheniya: 15.03.2017).

7. Lifshic A.M. Perekhod k Smart Grid i cifrovym podstanciyam. Gibridnyj variant postroeniya seti svyazi i peredachi dannyh // Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem avtomatizacii. 2013. №4.

8. Lizunov I.N., Vasev A.N., Misbahov R.Sh., Fedotov V.V., Huziahmetova Eh.A. Tekhnologii peredachi dannyh v sovremennyh sistemah relejnoj zashchity i avtomatiki i ih pokazateli kachestva // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy ehnergetiki. 2017. V.19, №1–2. P.52–63. DOI:10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-52-63.

9. Ivanov V.I. Primenenie tekhnologii WDM v sovremennyh setyah peredachi informacii . Kazan', 2010. 148s.

10. Misbahov R. SH. Volokonno-opticheskaya mnogosensornaya sistema dlya kontrolya temperatury kommutacionnyh i tokovedushchih ehlementov ehnergeticheskikh ob"ektov na osnove brehggovskih reshetok s dvumya simmetrichnymi fazovymi sdvigami.: Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. 174s.

11. Denisenko P.E. Volokonno-opticheskie brehggovskie datchiki so special'noj formoj spektra dlya sistem klimaticheskikh ispytaniy: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni k.t.g. 177s.

12. Misbahov R.SH. Volokonno-opticheskaya mnogosensornaya sistema dlya kontrolya temperatury kommutacionnyh i tokovedushchih ehlementov ehnergeticheskikh ob"ektov na osnove brehggovskih reshetok s dvumya simmetrichnymi fazovymi sdvigami: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : 05.11.07 / Rustem SHaukatovich Misbahov. «Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet im. A.N. Tupoleva – KAI» (KNITU–KAI). Kazan', 2017. 30 s.

Authors of the publication

Alexey N. Vasev – JSC "Network Company" Naberezhnochelninsky electric networks, Naberezhnye Chelny, Russia. Email: argentums@mail.ru.

Rinat Sh. Misbahov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: zerdex@bk.ru.

Aysylu I. Ziganshina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: ais-94@mail.ru.

Vladislav V. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: vladislavfedotov1408@gmail.com.

Поступила в редакцию

07 августа 2018 г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАВКОСТИ ЗОЛЫ ТОРФА МЕСТОРОЖДЕНИЙ КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков

Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

ivan109292@gmail.com

Резюме: В работе рассматриваются вопросы, связанные с эффектом шлакования топок паровых энергетических котлов и результаты определения плавкости золы торфа месторождений Кировской области. По четырем производственным участкам (Дымный, Пищальский, Каринский, Гороховский) представлены плавкостные свойства золы (температуры деформации, сферы, полусферы, растекания) в зависимости от ее химического состава. Температура плавления минеральной части торфа, определяемая по ГОСТу, является усредненной и не отражает реальной температуры плавления отдельных частиц в летучей золе. Наличие таких отдельных частиц, имеющих температуру плавления ниже средней температуры плавления золы, затрудняет нахождение рабочей температуры факела, обеспечивающей наименьшее шлакование топки при сжигании торфа. Выполнено сравнение плавкостных характеристик золы торфа со справочными литературными данными. Вычислена температура начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа.

Ключевые слова: температура деформации, температура сферы, температура полусферы, температура растекания, температура начала шлакования, шлакование, химический состав.

Благодарности: Работа, по результатам которой представлена статья, выполнена по программе «Аспирантура 2.0» ФГБОУ ВО «ВятГУ», приказ № 925 от 24.10.2017.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33.

Для цитирования: Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 27-33. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33.

DETERMINATION OF PEAT ASH FUSIBILITY OF KIROV REGION DEPOSITS

V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, I.A. Desiatkov

Vyatka State University, Kirov, Russia

ivan109292@gmail.com

Abstract: the paper deals with the issues related to the effect of slagging within the steam boilers furnaces and shows the determination results on peat ash fusibility of Kirov region deposits. Fusibility properties of peat ash (temperatures of deformation, sphere, hemisphere and flow) from the four industrial areas (Dymny, Pishchalsky, Karinsky, Gorokhovsky) depending on its chemical composition are presented. Melting temperature of the mineral part of the peat, determined by

GOST, is averaged and does not reflect the actual melting temperature of the individual particles in fly ash. The existence of such separate particles having a melting temperature below the average melting temperature of the ash makes it difficult to find the operating temperature of the torch to reach the minimum of the furnace slagging during peat combustion. The comparison of melting characteristics of peat ash with the reference literature data is performed. The initial slagging temperature is calculated depending on the ratio of the acidic and basic oxides in peat ash.

Keywords: deformation temperature, sphere temperature, hemisphere temperature, flow temperature, initial slagging temperature, slagging, chemical composition.

Acknowledgments: The reported study was performed under the program "Post graduate course 2.0" in VyatSU according to the order № 925 from 24.10.2017

For citation: V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, I.A. Desiatkov Determination of peat ash fusibility of kirov region deposits. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 27-33. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-27-33.

Введение

Процесс шлакования накладывает ряд ограничений на организацию режима работы котельного оборудования, повышает износ экранных и конвективных поверхностей котла, снижает эффективность теплообмена факела с поверхностями нагрева котельного агрегата, повышает аэродинамическое сопротивление по газходам, интенсифицирует процесс коррозии [1].

На данный момент большинство теплоэлектроцентралей европейской части России переведено на сжигание природного газа, при котором не нужно уделять внимание проблемам шлакования и, следовательно, использованию специальных конструктивных и режимно-наладочных приемов. Однако на некоторых объектах использование природного газа невозможно, либо возможно в ограниченных объемах в силу экономических, стратегических, социальных или иных причин. Одним из таких объектов является Кировская ТЭЦ-4, входящая в состав ПАО «Т Плюс» и использующая в качестве топлива фрезерный торф с подсветкой природным газом. Фрезерный торф используется из-за близости месторождений к точке потребления, что дает низкую стоимость топлива, и из-за нехватки объемов природного газа, прокачиваемого через газотранспортную систему, особенно в осенне-зимний отопительный период.

При прохождении ТЭЦ-4 осенне-зимнего отопительного периода периодически оперативным персоналом станции поднимается вопрос о шлаковании топочных и конвективных поверхностей котла, поэтому перед службами ТЭЦ ставится задача поиска оптимальных режимов работы котельных агрегатов. Данная работа невозможна без определения и изучения характеристик топлива, в том числе плавкостных характеристик зольного остатка фрезерного торфа.

Свойство золы торфа постепенно переходить из твердого состояния в жидко-плавкое при нагревании в стандартных условиях называется *плавкостью* и характеризуется набором температур, при которых происходят характерные изменения формы образца. В настоящее время плавкость золы – общепринятый показатель, характеризующий свойства золы образовывать шлаки в топках (шлакуемость топлива). Шлакуемость и загрязнение золой теплообменных поверхностей в котле напрямую зависит от качественного и количественного химического состава минеральной части торфа и рабочей температуры в топке котла [2–3]. Как правило, зола торфа состоит из оксидов SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO ,

K_2O_3 , MgO , NaO , которые имеют разные химические свойства и отличаются по температуре плавления. На долю оксидов кремния (SiO_2), алюминия (Al_2O_3), железа (Fe_2O_3) и кальция (CaO) приходится более 80 % массы золы. Входящие в состав минеральных примесей оксиды SiO_2 и Al_2O_3 повышают температуру плавления золы, а оксиды Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O и Na_2O понижают ее. Температура плавления золы зависит от соотношения содержания кальция и кремнекислоты в золе топлива, понижаясь с увеличением содержания кальция [4, 5].

Методика исследования

В данной работе исследовались плавкостные характеристики золы торфа, добываемого на территории Кировской области с 4-х производственных участков: Дымный (поселок Светлополянск Верхнекамского района), Пищальский (поселок Мирный Оричевского района), Каринский (поселок Октябрьский Слободского района), Гороховский (поселок Комсомольский Котельничского района).

Определение плавкости золы торфа было произведено на основании ГОСТ 32978-2014 «Топливо твердое минеральное. Определение плавкости золы» в сотрудничестве с испытательным центром (ИЦ) «Теплотехник» ОАО «Всероссийский теплотехнический институт» (ВТИ).

Для выполнения исследований использовалось следующее основное оборудование: весы лабораторные электронные, электропечь лабораторная SNOL 7.2/1100, преобразователь термоэлектрический (термопара) для измерения температуры с измерительным прибором. В ходе эксперимента записывались температуры, при которых происходят характерные изменения формы образца.

Температура деформации, T_1 определяет температуру, при которой появляются первые признаки оплавления и скругления верхушки или кромок испытуемого образца вследствие его размягчения или происходит наклон вершины пирамиды.

Зола торфа в зависимости от температуры деформации T_1 делится на три категории: легкоплавкая ($T_1 < 1273$ K), среднеплавкая ($T_1 = 1273 - 1473$ K) и тугоплавкая ($T_1 > 1473$ K) [4, 6–7].

Температура, при которой образцы принимают приблизительно сферическую форму, называют *температурой сферы*, T_2 . При этом высота образцов в виде трехгранной пирамиды или усеченного конуса становится равной ширине основания, а высота образцов кубической или цилиндрической формы остается неизменной. Кромки этих образцов становятся полностью скругленными.

Температура полусферы, T_3 , показывает температуру, при которой испытуемый образец принимает приблизительно полусферическую форму, т. е. его высота становится равной половине ширины основания.

На последнем этапе фиксируется *температура растекания*, T_4 , при которой расплавленная зола растекается по подставке, образуя слой, высота которого равна одной трети высоты образца при температуре полусферы.

В зависимости от температуры начала жидкоплавкого состояния T_4 , все твердые топлива разделяются на три группы: с легкоплавкой золой ($T_4 < 1623$ K); с золой средней плавкости ($T_4 = 1623 - 1723$ K); с тугоплавкой золой ($T_4 > 1723$ K).

Результаты исследования

В таблице приведены результаты испытаний плавкости золы торфа в зависимости от ее химического состава по четырем месторождениям Кировской области.

Температура плавления минеральной части торфа, определяемая по ГОСТу 32978-2014, является усредненной и не отражает реальной температуры плавления отдельных частиц в летучей золе [8]. Наличие таких отдельных частиц, имеющих температуру плавления ниже средней температуры плавления золы, определяемой по ГОСТу, затрудняет нахождение рабочей температуры факела, обеспечивающей наименьшее шлакование топки.

Температура начала шлакования $T_{\text{шл}}$ определяет температуру газов, при которой на теплообменных поверхностях наблюдаются быстрораствующие золые отложения, с составом, близким к минеральной части топлива.

В работах [9–10] приводятся формулы для определения температуры начала шлакования $T_{\text{шл}}$ по химическому составу золы.

$$T_{\text{шл}} = 1218 + 7,77 \cdot K/O \text{ при } K/O > 2,25, \quad (1)$$

$$T_{\text{шл}} = 1213 + \frac{52,23}{K/O} \text{ при } K/O < 2,25, \quad (2)$$

где $K = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ (сумма кислотных оксидов); $O = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (сумма основных оксидов).

Результаты расчетов температуры шлакования указанных образцов приведены в таблице.

Таблица

Химический состав и плавкость золы торфа

Наименование показателя	Производственный участок				Справочник энергетических топлив СССР [11]
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский	
SiO_2 , %	47,59	31,97	30,92	57,15	47,00
Al_2O_3 , %	18,96	10,13	8,27	12,36	14,50
TiO_2 , %	0,45	0,34	0,37	0,58	0,40
Fe_2O_3 , %	20,84	23,42	8,33	6,13	20,40
CaO , %	4,88	18,24	31,14	9,95	12,10
MgO , %	0,62	1,14	4,30	1,32	2,20
K_2O , %	1,22	0,71	0,56	1,54	0,70
Na_2O , %	0,38	0,30	0,23	0,77	0,80
P_2O_5 , %	4,02	2,65	1,80	1,54	1,90
SO_3 , %	0,55	8,95	11,98	7,13	–
Сумма кислотных оксидов К, %	67	42,44	39,56	70,09	61,9
Сумма основных оксидов О, %	7,1	20,39	36,23	13,58	15,8
К/О	9,44	2,08	1,09	5,16	3,92
Температура начала шлакования $T_{\text{шл}}$, К (1) и (2)	1291	1238	1261	1258	1248
Температура деформации T_1 , К	1473	1413	1453	1403	1513
Температура сферы T_2 , К	1543	1443	1463	1453	1543
Температура полусферы T_3 , К	1593	1493	1463	1553	–
Температура растекания T_4 , К	1623	1523	1483	1623	1653

Зависимости плавкостных температур и температур начала шлакования от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа показаны на рисунке.

Зависимость $T_{\text{шл}}$ от К/О для указанных образцов представляет кривую с минимумом, соответствующему $K/O \approx 2$. С увеличением доли кислотных оксидов в золе торфа температура начала шлакования увеличивается и достигает максимального значения

$T_{\text{шл}}=1291$ К для образца Дымного месторождения. Экспериментально измеренные температуры плавкости также определяются отношением К/О в исходной золе торфа. Зола торфа Пищальского, Каринского и Гороховского месторождений можно считать среднеплавкой по температуре деформации, а зола Дымного месторождения находится на границе между средне- и тугоплавкой золой. Основываясь на температуре растекания, Пищальское и Каринское месторождения представляют торф, имеющей легкоплавкую золу, а Гороховское и Дымное – среднеплавкую.

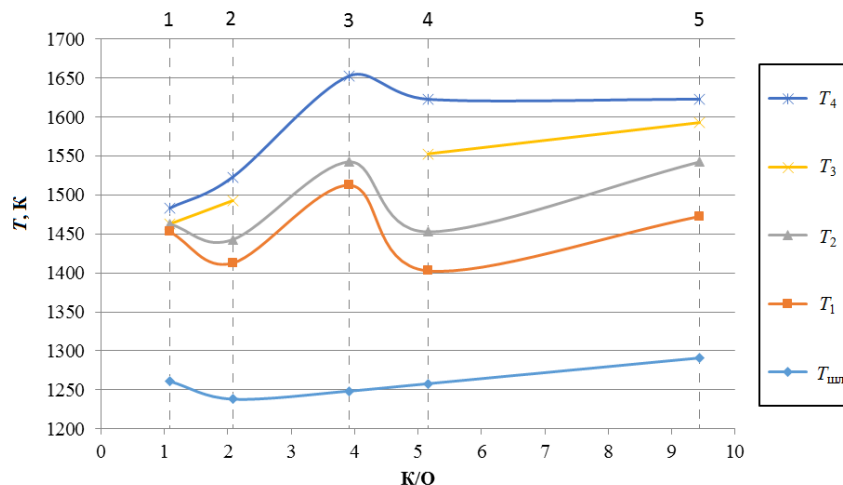


Рис. Плавкость золы торфа и температура начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа: 1 – Каринский; 2 – Пищальский; 3 – Справочник [11]; 4 – Гороховский; 5 – Дымный

Обсуждение результатов

Фиксируемые точки температур плавкости по данной методике значительно выше тех, при которых появляется жидкая фаза и начинается шлакование [9]. Уже первая фиксируемая температура T_1 на 145–192 К выше температуры начала шлакования $T_{\text{шл}}$. По физико-химическому смыслу температура $T_{\text{шл}}$ соответствует температуре ликвидуса (устойчивости) сульфидно-силикатного расплава, образующегося при нагревании образцов. Склеивающая жидкая фаза объясняет закрепление (налипание) частиц при формировании шлаковых отложений с химическим составом золы, близким к золе исходного топлива [12].

Справочные значения по температурам деформации и сферы, а также температуре растекания резко выбиваются из общей экспериментально зависимости. Это может зависеть от использования другой методики проведения испытаний и от газовой среды, в которой проводится нагревание золы. Разность между температурами плавкости золы в окислительной и восстановительной средах может составлять в среднем 70 – 90 К. Это связано с поведением соединений железа: в восстановительной среде образуются легкоплавкие эвтектики закисных форм железа (FeO) с алюмосиликатами, а в окислительной – тугоплавкий оксид железа Fe_2O_3 .

Заключение

Проведенное сравнение плавкостных характеристик золы торфа со справочными литературными данными показало, что усредненные литературные данные не позволяют использовать их для организации процесса сжигания торфа, обеспечивающего наименьшее шлакование топki. Меняющиеся характеристики поступающего торфа, а соответственно химический состав и плавкостные характеристики золы, определяют температурные

условия начала формирования шлаковых отложений и необходимые режимы сжигания топлива.

Литература

1. Попов В.М., Шабаров А.М., Гушчин А.И. Энергетическое использование фрезерного торфа. М.: Энергия, 1974. 303 с.
2. Fagerström J. Influence of peat Ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion // Energy Fuels. 2014. Vol. 28(5). P. 3403–3411. <https://doi.org/10.1021/ef4023543>.
3. Heikkinen R. Slagging tendency of peat ash // Fuel Processing Technology. 1998. Vol. 56. P. 69–80.
4. Справочник потребителя биотоплива / Виллу Варес, Юло Каск, Пеэтер Муйсте и др./ под ред. Виллу Вареса. Таллин: Изд-во Таллинского технического университета, 2005. 183 с.
5. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976. 488 с.
6. Базин Е.Т. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 431 с.
7. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.
8. Алехнович А.Н., Артемьева Н.В. Некоторые проблемы и первоочередные задачи математического моделирования шлакования топки // Горение твердого топлива: материалы Всерос. VIII конф. с междунар. участием, 13–16 ноября 2012 г., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, 2012. 4.1 – 4.8.
9. Алехнович А. Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. 112 с.
10. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е., Артемьева Н.В. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // Теплоэнергетика. 1997. №3. С. 64–68.
11. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / И.И. Матвеева, Н.В. Новицкий, В.С. Вдовченко, и др. Москва: Энергия, 1979. 128 с.
12. Гладков В.Е., Афлятунов Ж.З., Викторов В.В. Температурные условия начала формирования шлаковых отложений при их факельном сжигании // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». 2006. №7. С. 227–232.

Авторы публикации

Кузьмин Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная физика» Вятского государственного университета.

Заграй Ираида Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Вятского государственного университета.

Десятков Иван Андреевич – аспирант Вятского государственного университета.

References

1. V.M. Popov, A.M. Shabarov, A.I. Gushchin, Energy use of milled peat, Energiya, Moscow, 1974, 303 p. (in Russian)
2. J. Fagerström, Influence of peat Ash composition on particle emissions and slag formation in biomass grate co-combustion, Energy Fuels, 2014, Vol. 28(5), P. 3403–3411. <https://doi.org/10.1021/ef4023543>.
3. R. Heikkinen, Slagging tendency of peat ash, Fuel Processing Technology, 1988, Vol. 56, P. 69–80.

4. Villa Vares, Yulo Kask, Peeter Muiste et al., Biofuel consumer handbook, Tallinn University of technology, Tallin, 2005. 183 p. (in Russian)
5. D.M. Khzmalyan, Y.A. Kagan, Combustion theory and furnace devices, Energiya, Moscow, 1976, 488 p. (in Russian)
6. E.T. Bazin, Technical analysis of peat, Nedra, Moscow, 1992, 431 p. (in Russian)
7. I.I. Lishtvan, N.T.Korol', Basic peat properties and methods of their determination, Nauka i tehnika, Minsk, 1975, 320 p. (in Russian)
8. A.N. Alekhnovich, N.V. Artem'eva, Some problems and priority tasks of mathematical modeling of furnace slagging, Solid fuel combustion: materials of the VIII all-Russian conference with Intern. participation, 13-16 November 2012, Institute of Thermophysics (IT SB RAS), Novosibirsk, 2012. 4.1–4.8. (in Russian)
9. A.N. Alekhnovich, Slagging of pulverized coal-fired power boilers, NTF Energoprogress, Moscow, 2013. 112 p. (in Russian)
10. A.N. Alekhnovich, V.V. Bogomolov, V.E. Gladkov, N.V. Artem'eva, Slagging and deposit formation in the gas path of a boiler, Thermal Engineering, 1997, Vol. 44, No. 3, P. 239-243.
11. Energy fuel of the USSR (fossil coals, oil shale, peat, fuel oil and combustible natural gas): Directory, I.I. Matveeva, N.V. Novitsky, V.S. Vdovchenko, et al. Energiya, Moscow, 1979, 128 p. (in Russian)
12. V.E. Gladkov, Zh.Z. Aflyatunov, V.V. Viktorov, Temperature conditions of the beginning of formation of slag deposits at their flaring, Bulletin of SUSU, Series "Mathematics, physics, chemistry", 2006, No. 7, P. 227-232. (in Russian)

Authors of the publication

Vladimir A. Kuzmin –Grand PhD in Engineering sciences, Professor Vyatka state University, Kirov, Russia.

Iraida A. Zagrai– PhD in Engineering sciences, Associate Professor Vyatka state University, Kirov, Russia.

Ivan A.Desiatkov– PhD student Vyatka state University, Kirov, Russia. E-mail: ivan109292@gmail.com.

Поступила в редакцию

18 июня 2018 г.

УДК 621.311.001.57, 621.316.1

**АНАЛИЗ РИСКА ОТКАЗА ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПУТЕМ ОЦЕНКИ
ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
ПО ДАННЫМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Д.А. Глухов¹, Э.Ф. Хакимзянов², Д.Е. Титов³, Г.Г. Угаров⁴, Р.Г. Мустафин²

¹Филиал АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ, г. Саратов, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Сколковский институт науки и технологий, ООО «МИГ», г. Москва, Россия

⁴«Камышинский технологический институт» филиал ФБГОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет», г. Камышин, Россия

motor_da@mail.ru

Резюме: В статье предложен метод оценки состояния изоляции воздушных линий электропередачи с использованием данных синхронизированных векторных измерений, приведено обоснование необходимых диагностических параметров.

Ключевые слова: мониторинг, оценка, изоляция, воздушные линии электропередачи, риск-ориентированный подход.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-34-45.

Для цитирования: Глухов Д.А., Хакимзянов Э.Ф., Титов Д.Е., Угаров Г.Г., Мустафин Р.Г. Анализ риска отказа линейной изоляции путем оценки поперечной проводимости воздушных линий электропередач по данным синхронизированных векторных измерений// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 34-45. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-34-45.

**ANALYSIS OF RISK OF FAILURE OF LINEAR INSULATION BY EVALUATING
THE CROSS-SECOND CONDUCTIVITY OF TRANSMISSIONS LINES BY DATA OF
SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENTS**

D.A. Glukhov¹, E.F. Khakimzyanov², D.Ye. Titov³, G.G. Ugarov⁴, R.G. Mustafin²

¹System Operator of the United Power System, Saratov, Russia

²Kazan state power university, Kazan, Russia

³Skolkovo Institute of Science and Technology, Mig OOO (Limited Liability Company),
Moscow, Russia

⁴Kamyshin Institute of Technology, Kamyshin, Russia

motor_da@mail.ru

Abstract: In the article the method of an estimation of a condition of isolation of overhead transmission lines with use of the data of the synchronized vector measurements is offered, the justification of necessary diagnostic parameters is resulted.

Keywords: monitoring, assessment, isolation, overhead power lines, risk-oriented approach.

For citation: D.A. Glukhov, E.F. Khakimzyanov, D.Ye. Titov, G.G. Ugarov, R.G. Mustafin.

Analysis of risk of failure of linear insulation by evaluating the cross-second conductivity of transmissions lines by data of synchronized vector measurements. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 34-45. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-34-45.

Введение

Согласно отчету [1], основной причиной отказов электрооборудования (ЭО) за 2016 год является износ (более 20%), при этом основной причиной износа ЭО является старение и загрязнение изоляции. Сводные данные о причинах нарушений надежности электросетевого комплекса (ЭСК) приведены в табл.1 [1].

Стоит отметить, что отказ изоляции происходит не только вследствие старения, но и вследствие стихийных явлений (16,7% отказов), недостатков эксплуатации (13,3%), связанных с несвоевременными или некачественными работами по выявлению и устранению загрязнений и дефектов изоляции. Отказ изоляции происходит и вследствие других причин, также приведенных в табл.1. Часть отказов ВЛ из-за атмосферных перенапряжений также заключается в плохом состоянии изоляции.

Таблица 1

Причины нарушений надежности работы ЭСК в 2016 году

Причина нарушений	% от общего объема нарушений
Износ вследствие старения изоляции	20,7
Воздействия стихийных явлений	16,7
Падение деревьев	14,1
Недостатки эксплуатации	13,3
Воздействие посторонних лиц	12,6
Атмосферные перенапряжения	12,3
Воздействия птиц и животных	6,8
Конструктивные дефекты	2,3
Сверхнормативные воздействия стихии	1,2

Приведенные факты являются причиной применения планово-предупредительного подхода к осмотру, замене и чистке изоляции. Согласно Положению [2], в ЭСК намечен переход от системы планово-предупредительного оказания воздействия на активы к риск-ориентированному управлению активами (РОП). В связи с этим, в настоящее время невыясненными остаются вопросы оценки риска возникновения отказов и оценки последствий таких отказов.

Риск-ориентированный подход к управлению ЭО

РОП представляет собой методологию, обеспечивающую целевое воздействие надзорных функций на объекты контроля, основанные на анализе состояния технических устройств, риска их аварий и инцидентов в соответствии со значимостью последствий таких аварий и инцидентов [3]. Под риском понимается событие, которое может произойти в будущем с определенной вероятностью и нанести определенный ущерб [4]. Риск может быть результатом как действия, так и бездействия.

В соответствии с методологией РОП, сформировались два основных направления исследований: исследования в области создания методологии оценки вероятности отказа и исследования с целью создания методик оценки последствий таких отказов. Оценка последствий отказов, основным фактором которой является длительность перерывов электроснабжения потребителей, должна включать в себя экономические показатели ущерба. Такая статистика по ЭСК ПАО «Россети» за 2016 год показана на рис.1 [1].

Как видно из рис.1, наиболее длительные перебои электроснабжения наблюдались в Центральной, Южной частях России и в районах Поволжья. Концепция РОП на примере использования данных, представленных на рис.1, предполагает увеличение плановых затрат на противоаварийные мероприятия в тех дочерних сетевых компаниях ПАО «Россети», в которых продолжительность перебоев электроснабжения выше всего.

Методология оценки вероятности отказов должна строиться на основании статистики отказов, а также на основании результатов мониторинга состояния ЭО. Мониторинг при этом должен подразумевать непрерывный неразрушающий контроль.

Проблема оценки состояния изоляции воздушных линий электропередачи

На сегодняшний день основными методами диагностики состояния изоляции воздушных линий электропередачи (ВЛ) являются:

- визуальный осмотр;
- тепловизионный контроль;
- рентгенографическая диагностика;
- ультрафиолетовая диагностика;
- периодические высоковольтные испытания изоляции;
- непрерывный мониторинг посредством измерения токов утечки.

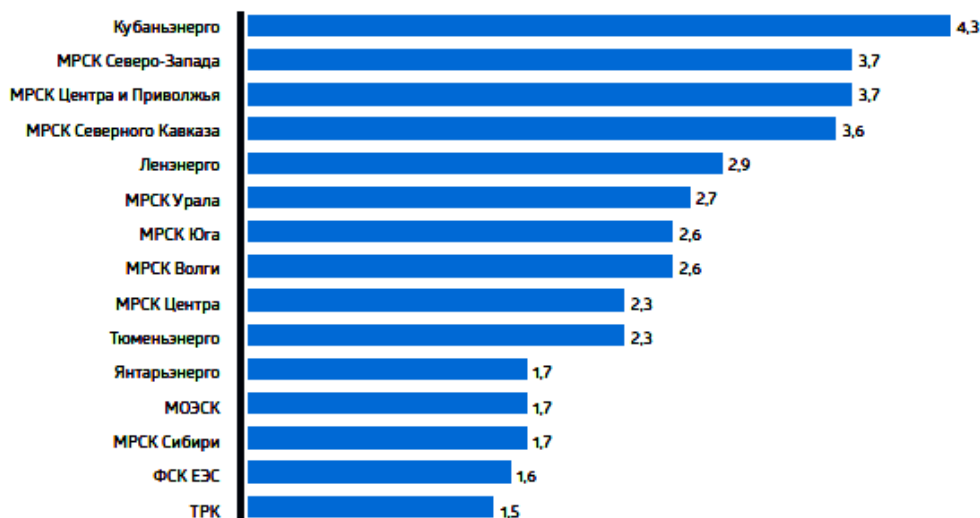


Рис. 1 Средняя длительность перебоев электроснабжения потребителей в сети 6 кВ и выше, в результате технологических нарушений (давай лучше в табл. с расшифровкой ТРК)

Все перечисленные мероприятия являются локальными методами обследования состояния изоляции. Для их применения необходимо сначала определить объект контроля (ВЛ), а также место проведения превентивной диагностики. В масштабах ЭСК выбрать первоочередной объект для диагностики бывает затруднительно. Более того, учитывая, что наиболее информативным параметром, отображающим состояние изоляции, является ток утечки, такой вид контроля состояния изоляции как визуальный осмотр зачастую малоэффективен.

Стоит отметить, что на настоящий момент нет готовых инструментов косвенной оценки увеличения тока утечки в какой-то из ВЛ. Однако увеличение тока утечки в изоляции ВЛ можно определить на основании оценки параметров схемы замещения. В соответствии со схемой замещения токоведущие части ВЛ электрически связаны с землёй поперечной проводимостью Y , следовательно суммарный ток утечки, протекающий по контурам фаза-земля-нейтраль, и фаза-земля-фаза, зависит от величины этой проводимости.

Применяемыми стандартными средствами оценки состояния на основании данных телеметрической информации невозможно определить поперечную проводимость ВЛ, однако, в связи с масштабным внедрением в ЕЭС России системы синхронизированных векторных измерений (СВИ), появилась возможность высокоточной оценки состояния ВЛ, а следовательно – оценки ее поперечной проводимости. В связи с этим, для формирования методики такой оценки необходимо определить главные измеряемые посредством СВИ параметры и математическую модель поперечной проводимости на основании данных СВИ.

Современное состояние и перспективы развития систем синхронизированных векторных измерений

Современные системы мониторинга переходных режимов (СМПР) в России состоят из устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) и концентраторов синхронизированных векторных данных (КСВД). Сбор информации для задач оперативно-диспетчерского и автоматического управления ЭЭС осуществляется в двух режимах: *on-line* и *off-line*. Создание системы мониторинга переходных режимов в России было инициировано ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС» в 2005 году в рамках проекта «ТЭО синхронного объединения энергосистем UCTE и ЕЭС/ОЭС» [5, 6]. В 2006 году на 16 энергообъектах ЕЭС была введена в эксплуатацию первая очередь СМПР. В 2015 году количество оснащенных энергообъектов составляло уже 69, а общее количество УСВИ достигло 400. На 2017 год комплексами СМПР оснащены 85 объектов, количество УСВИ составляет 551 устройство [7]. Диаграмма оснащённости СМПР ЕЭС России показана на рис. 2.

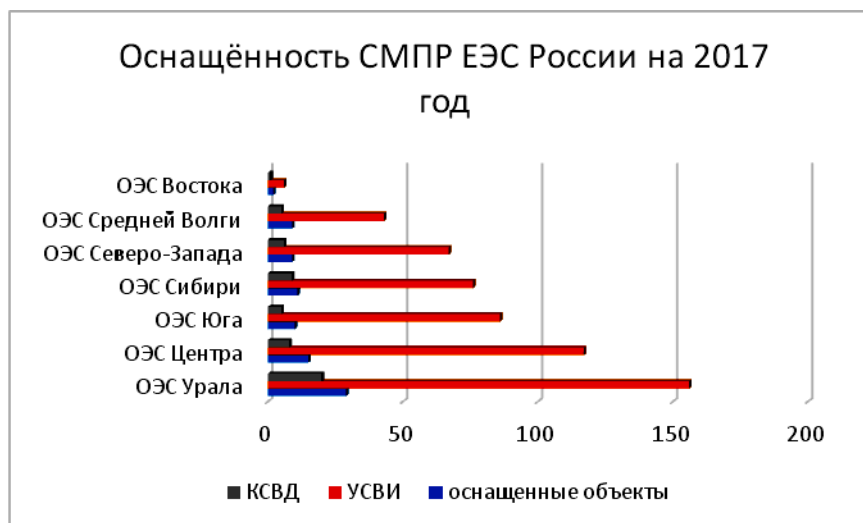


Рис. 2 Оснащённость СМПР ЕЭС России на 2017 год [6]

Наибольшее количество объектов, оснащенных СМПР, находится в ОЭС Урала (29 объектов, 156 УСВИ), наименьшая оснащённость – в ОЭС Востока (2 объекта, 6 УСВИ). Общее количество КСВД по ЕЭС России на 2017 год составляет 47 устройств.

К 2020 году планируется оснастить СМПР порядка 200 объектов [8]. Концепция предполагает на первом этапе оснастить СМПР все ПС классом напряжения 500 кВ и выше, а также электрические станции установленной мощностью 500 МВА и выше [9].

По мере развития СМПР в России сложились предпосылки к нормированию характеристик УСВИ. Сегодня существует Стандарт АО «СО ЕЭС» [10], устанавливающий:

- требования к функциональности УСВИ;
- требования к составу измеряемых параметров УСВИ;
- требования к метрологическому обеспечению УСВИ;
- требования к синхронизации измерений УСВИ;

– порядок и методику сертификационных испытаний УСВИ, а также минимальный перечень документов и информации по УСВИ, подлежащих представлению заявителем на рассмотрение органу по добровольной сертификации.

Все вновь разрабатываемые и модернизируемые УСВИ в ЕЭС России должны соответствовать указанному стандарту. В табл. 2 сведены данные по точности существующих в мире промышленных УСВИ.

Как видно из табл. 2, применяемые в ЕЭС России УСВИ являются наиболее точными в части замера углов векторов, а также частоты. Согласно [10] для синхронизации УСВИ должны использоваться приемники сигналов глобальных навигационных систем с точностью синхронизации не хуже 1 мкс, что соответствует погрешности измерений 0,018 эл. градусов. Стоит отметить, что современные спутниковые системы имеют точность 15 нс, что соответствует точности 0,00027 эл. градусов.

Таблица 2

Сводные данные по точности существующих промышленных УСВИ

УСВИ	SMART-WAMS (Россия)	BEN6000 (Бельгия)	SEL 421 (США)	RES 521 (Швеция)	Arbiter (США)
U , кВ	$\pm(0,3-0,5) \%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,02\%$
Фазовый угол	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,3^\circ$
I_{ij} , А	$\pm(0,3-0,5) \%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,03\%$
Угол φ_{ij} между I_{ij} и U_i	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$
Частота, Гц	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,01$	$\pm 0,002$	$\pm 0,005$

На основании указанных данных стоит отметить возможность измерения векторов токов и напряжений по концам ВЛ с достаточно высокой точностью. Используя указанные данные, можно производить косвенную оценку состояния изоляции ВЛ с целью выявления наиболее рискованного элемента электрической сети. Для формирования методики такой оценки необходимо определить главные измеряемые посредством СВИ параметры и математическую модель поперечной проводимости на основании данных СВИ.

Определение диагностических параметров для оценки состояния изоляции с использованием данных СВИ

На рис. 3 показана принципиальная схема (а) и П-образная схема замещения (б) ВЛ.

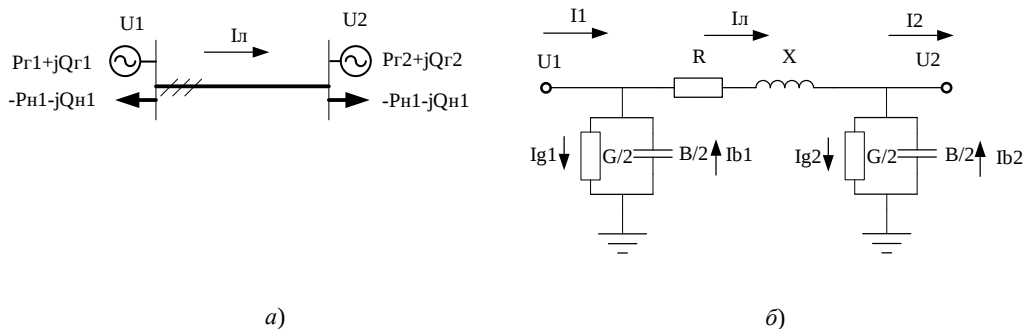


Рис. 3 Однолинейная схема ВЛ

а – принципиальная; б – П-образная схема замещения

Приведенная схема является универсальной для обозначения ВЛ, соединяющей две части энергосистемы (ЭС) вне зависимости от количества источников питания. Приняв за нулевое значение генерацию $P_{Г2} + jQ_{Г2}$, можно получить схему замещения для тупиковой ВЛ. В любом случае эквивалентная схема замещения выглядит еще более упрощенно, поскольку в передающем конце ВЛ суммарный баланс потребления/генерации можно изобразить эквивалентной генерацией, а в приемном – эквивалентной нагрузкой.

Ток, протекающий по участку цепи, зависит от разности модулей напряжений и от угла сдвига фаз δ по концам ВЛ. При этом разность модулей напряжения формирует переток реактивной мощности, а фазовый сдвиг (разность углов фазы по концам ВЛ) формирует переток активной мощности.

Обратимся к векторной диаграмме ВЛ (рис. 4), построенной для схемы замещения, представленной на рис. 3 в фазных значениях напряжений.

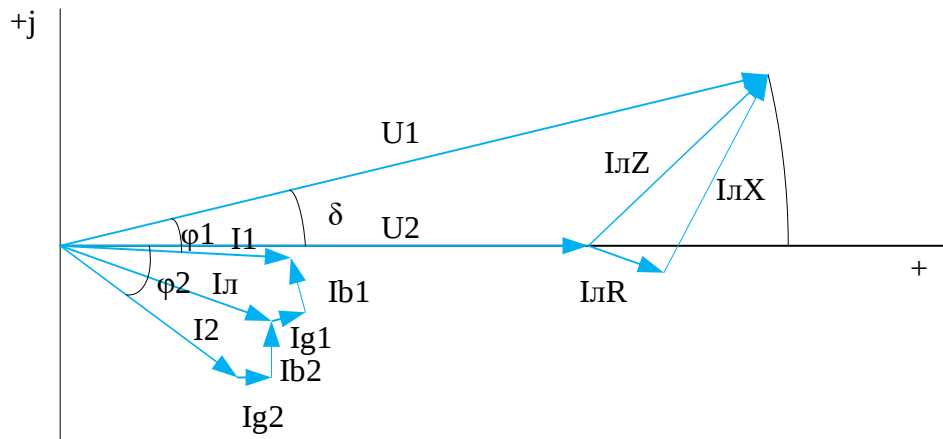


Рис. 4. Векторная диаграмма ВЛ

Из рис. 4 видно, что падение напряжения (геометрическая разность напряжений по концам ВЛ) зависит от тока линии $\underline{I}_л$ и продольного сопротивления ВЛ. Однако ток линии $\underline{I}_л$ невозможно измерить, поскольку эта величина имеет место лишь в П-образной схеме замещения (рис.3, б). Применительно к указанной схеме имеется возможность непосредственного замера векторов тока $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ по концам ВЛ. Имея синхронизированные векторы тока по концам ВЛ и зная параметры поперечной проводимости, можно определить ток $\underline{I}_л$ на основании схемы замещения (рис.3, б), и векторной диаграммы ВЛ (рис. 4):

$$\underline{I}_л = \underline{I}_2 + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{g2} = \underline{I}_1 - \underline{I}_{b1} - \underline{I}_{g1}; \quad (1)$$

где $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$ – синхронизированные векторы токов по концам ВЛ; $\underline{I}_{b1}$, $\underline{I}_{g1}$, $\underline{I}_{b2}$, $\underline{I}_{g2}$ – векторы токов поперечной проводимости для схемы на рис.3, причем:

$$\underline{I}_{bn} = \underline{U}_n \phi \frac{jB}{2}; \quad (2)$$

$$\underline{I}_{gn} = \underline{U}_n \phi \frac{G}{2}, \quad (3)$$

где $\underline{I}_{bn}$ – ток реактивной проводимости конца ВЛ; $\underline{I}_{gn}$ – ток активной проводимости конца ВЛ; $\underline{U}_n \phi$ – фазный вектор напряжения конца ВЛ.

Запишем выражение (1) с учетом (2) и (3):

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \frac{jB}{2} + \underline{U}_2 \frac{G}{2} + \underline{U}_1 \frac{jB}{2} + \underline{U}_1 \frac{G}{2}; \quad (4)$$

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = (\underline{U}_1 + \underline{U}_2) \cdot \left(\frac{jB}{2} + \frac{G}{2} \right). \quad (5)$$

Поскольку $jB + G = Y$, запишем выражение для полной поперечной проводимости Y , используя (5):

$$Y = \frac{2(\underline{I}_1 - \underline{I}_2)}{(\underline{U}_1 + \underline{U}_2)}. \quad (6)$$

В комплексной форме выражение (6) примет вид

$$Y = \frac{2(I_1 \cdot e^{jx_1} - I_2 \cdot e^{jx_2})}{(U_1 \cdot e^{jx_3} + U_2 \cdot e^{jx_4})}, \quad (7)$$

где I_1, I_2, U_1, U_2 – измеренные модули токов и напряжений по концам ВЛ; x_1, x_2, x_3, x_4 – фазовые углы векторов.

Таким образом, искомыми параметрами для определения поперечной проводимости являются: $I_1, I_2, U_1, U_2, x_1, x_2, x_3, x_4$.

Однако, учитывая низкое значение активной составляющей проводимости G для ВЛ 220 кВ и ниже, в особенности коротких, при помощи формулы (7) нельзя в полной мере обеспечить достаточный уровень точности оценки состояния изоляции. В качестве примера достаточно взять параметры действующей ВЛ 220 кВ Саратовская ГЭС–Балаковская протяженностью 10,45 км. Активная составляющая поперечной проводимости для указанной ВЛ на основании данных эксплуатирующей организации – Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Нижне-Волжское ПМЭС, составляет $G=0,3$ мкСм при полной поперечной проводимости, равной $Y=0,3-j29$ мкСм. Очевидно, что увеличение потерь в изоляции указанной ВЛ в 20 раз приведет к увеличению полной поперечной проводимости всего на 2%, что укладывается в погрешность первичных измерительных приборов, равную не более 3% в соответствии с [11] для трансформаторов напряжений и от 0,5% до 10% в зависимости от класса точности используемой для измерений обмотки в соответствии с [12].

С учетом сказанного следует отметить необходимость в определении непосредственно активной составляющей поперечной проводимости G для оценки риска отказа линейной изоляции.

Для определения активной составляющей поперечной проводимости необходимо разложить полученную в (7) полную активную проводимость на комплексные составляющие. Для начала запишем числитель в (7) в тригонометрической форме записи векторов на комплексной плоскости:

$$\begin{aligned} 2 \cdot (I_\Delta \cos(x_\Delta) + jI_\Delta \sin(x_\Delta)) = \\ 2 \cdot ((I_1 \cos(x_1) + jI_1 \sin(x_1)) - (I_2 \cos(x_2) + jI_2 \sin(x_2))) \end{aligned} \quad (8)$$

где I_Δ – модуль разности векторов тока по концам ВЛ.

Знаменатель в (7) в тригонометрической форме равен:

$$\begin{aligned} (U_\Sigma \cos(x_\Sigma) + jU_\Sigma \sin(x_\Sigma)) = \\ ((U_1 \cos(x_1) + jU_1 \sin(x_1)) + (U_2 \cos(x_2) + jU_2 \sin(x_2))) \end{aligned} \quad (9)$$

где U_Σ – модуль суммы векторов фазных напряжений по концам ВЛ.

Для определения Y по (7) необходимо (8) разделить на (9). Определим для начала модуль поперечной проводимости. Для этого разделим модули полученных в (8) и (9) величин:

$$Y = 2 \cdot \left| \frac{I_{\Delta} \cos(x_{\Delta})}{\cos \left(\arctg \left(\frac{jI_{\Delta} \sin(x_{\Delta})}{I_{\Delta} \cos(x_{\Delta})} \right) \right)} \right| \div \left| \frac{U_{\Sigma} \cos(x_{\Sigma})}{\cos \left(\arctg \left(\frac{jU_{\Sigma} \sin(x_{\Sigma})}{U_{\Sigma} \cos(x_{\Sigma})} \right) \right)} \right| =$$

$$2 \cdot \left| \frac{I_{\Delta} \cos(x_{\Delta})}{\cos \left(\arctg \left(\frac{jI_{\Delta} \sin(x_{\Delta})}{I_{\Delta} \cos(x_{\Delta})} \right) \right)} \right| \cdot \left| \frac{\cos \left(\arctg \left(\frac{jU_{\Sigma} \sin(x_{\Sigma})}{U_{\Sigma} \cos(x_{\Sigma})} \right) \right)}{U_{\Sigma} \cos(x_{\Sigma})} \right|; \quad (10)$$

Активную и емкостную составляющие определим на основании формулы деления комплексных чисел в тригонометрической форме:

$$Z = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{|Z_1|}{|Z_2|} \cdot (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + j \sin(\varphi_1 - \varphi_2)); \quad (11)$$

где Z – итоговое значение; Z_1 и Z_2 – соответственно делимое и делитель в комплексной форме.

Учитывая, что емкостная проводимость отрицательная, в выражении (10) в скобках вместо «+» будет «-». Соотношение модулей и есть Y (представлено в (10)). Приведя (10) к виду (11), получим отдельно по составляющим:

$$G = 2 \cdot \left| \frac{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)}{\cos \left(\arctg \left(\frac{jI_1 \sin(x_1) - jI_2 \sin(x_2)}{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)} \right) \right)} \right| \cdot \left| \frac{\cos \left(\arctg \left(\frac{jU_1 \sin(x_3) + jU_2 \sin(x_4)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right) \right)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right| \cdot$$

$$\cos \left(\arctg \left(\frac{jI_1 \sin(x_1) - jI_2 \sin(x_2)}{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)} \right) - \arctg \left(\frac{jU_1 \sin(x_3) + jU_2 \sin(x_4)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right) \right); \quad (11)$$

$$B = 2 \cdot \left| \frac{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)}{\cos \left(\arctg \left(\frac{jI_1 \sin(x_1) - jI_2 \sin(x_2)}{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)} \right) \right)} \right| \cdot \left| \frac{\cos \left(\arctg \left(\frac{jU_1 \sin(x_3) + jU_2 \sin(x_4)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right) \right)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right| \cdot$$

$$\left(-j \sin \left(\arctg \left(\frac{jI_1 \sin(x_1) - jI_2 \sin(x_2)}{I_1 \cos(x_1) - I_2 \cos(x_2)} \right) - \arctg \left(\frac{jU_1 \sin(x_3) + jU_2 \sin(x_4)}{U_1 \cos(x_3) + U_2 \cos(x_4)} \right) \right) \right); \quad (12)$$

где G и B – активная и емкостная проводимости ВЛ, мСм.

Для определения G и B в мкСм необходимо (11) и (12) умножить на 1000.

Поскольку в (11) и (12) использованы фазные значения напряжений и токов, проводимость можно определить для каждой фазы, а это значит, что можно не только выявить ВЛ с ухудшенными изоляционными свойствами, но и выявить фазу, что упрощает задачу диагностики состояния изоляторов.

Оценка погрешности первичных измерителей

С целью оценки влияния погрешности первичных измерителей тока и напряжения проведено моделирование ухудшения изоляции для ВЛ в ПК *RastrWin3* в соответствии с однолинейной схемой, приведенной на рис. 3. В качестве объекта моделирования

использовалась короткая ВЛ 110 кВ длиной 10 км (рис. 5). Параметры схемы замещения, рассчитанные в соответствии с [13], приведены в табл. 3.

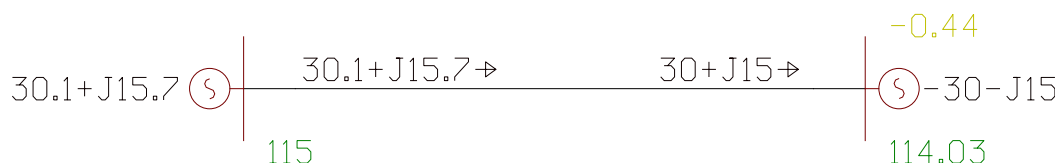


Рис. 5 исследуемая расчетная модель

Таблица 3

Среднегодовые параметры схемы замещения

Наименование	Длина, км	Марка провода	R, Ом	X, Ом	B, мкСм	G, мкСм
ВЛ 1	10	АС 185/29	1,59	4,13	27,47	0,066

Удельная активная проводимость для рассматриваемой ВЛ менялась в соответствии с табл. 4, составленной на основании данных об удельных потерях на корону в зависимости от погодных условий [13].

Таблица 4

Параметры активной поперечной проводимости для нормальной изоляции в зависимости от погодных условий

Погодные условия	Сухая погода	Сухой снег	Дождь	Изморозь	Среднегодовое значение
Удельные потери мощности на корону, кВт/км	0,02	0,1	0,3	1,0	0,08
Удельная активная проводимость, мкСм/км	0,00165	0,0083	0,0248	0,083	0,0066
Активная проводимость для ВЛ 1 (10 км), мкСм	0,017	0,083	0,25	0,83	0,066

Предварительный анализ данных табл. 4 позволил сделать вывод, что в зависимости от погодных условий значение активной проводимости ВЛ 110 кВ может увеличиваться в 50 раз для нормальной изоляции. Следовательно, увеличение активной проводимости в 50 раз не может быть связано с ухудшением изоляции. Более того, это служит основанием для необходимости учета погодных условий при оценке поперечной проводимости.

В ходе моделирования поперечная проводимость для рассматриваемой ВЛ менялась в диапазоне от 0,017 до 64 мкСм до увеличения полной поперечной проводимости в 2 раза. Опыты проводились для различных режимов загрузки ВЛ, при этом переток активной мощности по линии увеличивался от 0 до 30 МВт при коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,9$.

В ходе моделирования выявлено, что при постоянной нагрузке модули и углы векторов напряжений по концам ВЛ неизменны вне зависимости от величины поперечной проводимости, поэтому проводимый анализ был направлен на выявление изменений значений модулей и углов векторов тока, а также разницы углов векторов тока по концам ВЛ.

Предварительный итог исследовательской работы заключается в том, что при включении ВЛ в режиме холостого хода и изменении полной поперечной проводимости ВЛ в 2 раза за счет активной составляющей ток холостого хода изменяется многократно. Такой режим маловероятен, поэтому данные для режима холостого хода ВЛ не учитывались. Однако на основании этих данных можно сделать вывод, что в режиме холостого хода уровень погрешности первичных измерителей тока и напряжения вполне позволяет определить процесс увеличения поперечной проводимости ВЛ.

Итоги изменения значений модуля, угла, а также разности углов векторов тока по концам ВЛ для перетоков активной мощности по ВЛ от 5 до 30 МВт показаны на рис. 6.

Анализ результатов моделирования (рис. 6) показал: ВЛ, имеющие низкую активную поперечную проводимость (короткие ВЛ напряжением 110 кВ и ниже) сложно диагностировать с применением предложенного метода, поскольку изменения измеряемых величин укладываются в погрешность первичных измерителей (трансформаторов тока и напряжения), причем такие изменения снижаются с увеличением передаваемой по ВЛ мощности. Однако стоит отметить, что моделируемые изменения поперечной проводимости ВЛ не являются предаварийными. Это значит, что предлагаемый метод возможно использовать на ВЛ 110 кВ после более детального изучения. Результаты такого исследования будут приведены в следующей статье. Пока стоит отметить, что использование высокоточных измерительных трансформаторов, таких как оптические, позволит снять все вопросы о допустимости использования предложенного метода на коротких ВЛ напряжением 110 кВ и ниже.

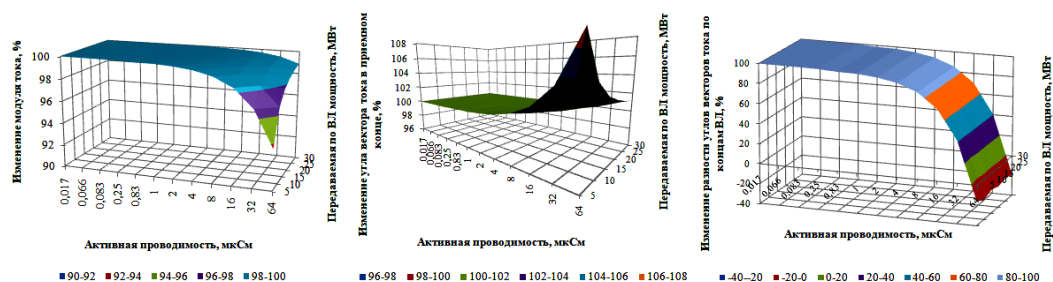


Рис. 6 Результаты моделирования процессов ухудшения изоляции короткой ВЛ 110 кВ

Выводы

1. Проведен анализ аварийности электросетевого комплекса. Выявлено, что одной из основных причин отказов электрооборудования, в частности ВЛ, является отказ изоляции.

2. Предложен метод оценки риска отказа изоляции ВЛ путем анализа данных синхронизированных векторных измерений по концам ВЛ.

3. Проведен анализ современного состояния и перспектив развития систем синхронизированных векторных измерений в ЕЭС России.

4. Сформирована математическая модель оценки поперечной проводимости фазы ВЛ на основании данных СВИ, а также ее отдельных составляющих.

5. Проведено моделирование процесса ухудшения изоляции путем увеличения активной составляющей поперечной проводимости короткой ВЛ 110 кВ в ПК *RasrWin3*; выявлено, что традиционные измерительные трансформаторы не позволяют провести полноценную оценку риска отказа изоляции для коротких ВЛ 110 кВ и ниже, однако использование оптических измерительных трансформаторов позволит расширить область применения предлагаемого метода.

Литература

1. Годовой отчет ПАО «Россети» за 2016 год. М.: ПАО «Россети», 2017. 206 с.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». М.: ПАО «Россети», 2017. 196 с.
3. Михалкин К.С. Внедрение системы риск-ориентированного подхода к организации надзорной деятельности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosnadzor.ru/activity/government/3%20-%20риск-ориентир%20подход-Михалкин-1.pdf>.
4. Политика управления рисками ОАО «Россети». М.: ОАО «Россети», 2014. 10 с.
5. Аюев Б.И. О системе мониторинга переходных режимов // Энергорынок. 2006. № 2.
6. Куликов Ю.А. Использование технологии векторного измерения параметров в ЕЭС России для информационного обеспечения оперативно-диспетчерского управления // Энергетик. 2009. № 1. С. 10–13.
7. Михайленко В.С., Рыбасова О.С., Костюкова С.С. Перспективы применения устройств векторной регистрации для оптимизации работы электрической сети в режиме реального времени // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02–06 октября 2017, Самара в 3 т. Т 2. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С.321–324.
8. Паспорт «Программы инновационного развития ОАО «СО ЕЭС» на 2016–2020 годы и на перспективу до 2025 года». ОАО «СО ЕЭС», 2016. 78 с.
9. Жуков А.В., Дубинин Д.М., Уткин Д.Н., Гайдамакин Ф.Н., Данилин А.В., Топорков Д.Н. Разработка и внедрение автоматической системы сбора информации с регистраторов системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // Релейщик. 2013. №3. С. 18–23.
10. СТО 59012820.29.020.011-2016 Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. АО «СО ЕЭС», 2016. 37 с.
11. ГОСТ 1983-2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 1983-2001; введен 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 44 с.
12. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 7746-2001; введен 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 39 с.
13. Справочник по проектированию электрических сетей / под редакцией Д.Л. Файбисовича М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

Авторы публикации

Глухов Дмитрий Александрович – ведущий специалист отдела устойчивости и противоаварийной автоматики службы электрических режимов. Филиал АО «СО ЕЭС» Саратовское РДУ. E-mail: gluhov@srdu.ru.

Хакимзянов Эльмир Фердинатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: eig86@mail.ru.

Титов Дмитрий Евгеньевич – канд. техн. наук, научный сотрудник Сколковского института науки и технологий, генеральный директор ООО «МИГ». E-mail: dm30081989@yandex.ru.

Угаров Геннадий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института - филиал ФБГОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». E-mail: motor_da@mail.ru.

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ramil.mustafin@gmail.com.

References

1. Godovoy otchet PAO «Rosseti» za 2016 god. M.: PAO «Rosseti», 2017. 206 p.
2. Polozheniye PAO «Rosseti» «O yedinoy tekhnicheskoy politiki v elektrosetevom komplekse». M.:PAO «Rosseti», 2017. 196 p.
3. Mikhalkin K.S. Vnedreniye sistemy risk - oriyentirovannogo podkhoda k organizatsii nadzornoy deyatel'nosti [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.gosnadzor.ru/activity/government/3%20-%20risk-oriyentir%20podkhod-Mikhalkin-1.pdf>.
4. Risk management policy of Rosseti JSC. M.: Rosseti OJSC, 2014. 10 p.
5. Ayuyev B.I. O sisteme monitoringa perekhodnykh rezhimov / Energorynok. 2006. N 2.
6. Kulikov Yu.A. Ispol'zovaniye tekhnologii vektornogo izmereniya parametrov v YEES Rossii dlya informatsionnogo obespecheniya operativno-dispatcherskogo upravleniya / «Energetik». 2009. N 1. Pp 10–13.
7. Mikhaylenko V.S. Perspektivy primeneniya ustroystv vektornoy registratsii dlya optimizatsii raboty elektricheskoy seti v rezhime real'nogo vremeni/ V.S. Mikhaylenko, O.S. Rybasova, S.S. Kostyukova// Elektroenergetika glazami molodezhi: nauchnyye trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 02-06 oktyabrya 2017, Samara. v 3 t. T 2. Samara: FGBOU VO SamGTU, 2017. P. 321–324.
8. Pasport «Programmy innovatsionnogo razvitiya OAO «SO YEES» na 2016-2020 gody i na perspektivu do 2025 goda». OAO «SO YEES», 2016. 78 p.
9. Zhukov A.V. Razrabotka i vnedreniye avtomaticheskoy sistemy sbora informatsii s registratorov sistemy monitoringa perekhodnykh rezhimov v YEES Rossii / A.V. Zhukov, D.M. Dubinin, D.N. Utkin, F.N. Gaydamakin, A.V. Danilin, D.N. Toporkov // Releyshchik. 2013. №3. P. 18–23.
10. STO 59012820.29.020.011-2016. Releynaya zashchita i avtomatika. Ustroystva sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy. Normy i trebovaniya. AO «SO YEES», 2016. 37 p.
11. GOST 1983-2015. Voltage transformers. General specifications. – In exchange for GOST 1983-2001; Enter. 2017-03-01. M.: Standartinform, 2016. 44 p.
12. GOST 7746-2015. Current transformers. General specifications. – In exchange for GOST 7746-2001; Enter. 2017-03-01. Moscow: Standartinform, 2016. 39 p.
13. Handbook on the design of electrical networks edited by D.L. Faibisovich, M.: ENAS, 2012. 376 p.

Authors of the publication

Dmitry A. Glukhov – PhD in Engineering sciences, Associate Professor Department of stability and antiemergency automatic equipment of service of the electric modes of System Operator of the United Power System, Saratov branch, Saratov, Russia. E-mail: gluhov@srdu.ru.

Elmir F. Khakimzyanov – Kazan state power university, Kazan, Russia. E-mail: eig86@mail.ru.

Dmitry Ye. Titov – PhD in Engineering sciences, researcher Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia. E-mail: dm30081989@yandex.ru.

Gennady G. Ugarov – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Kamyshev Institute of Technology, Kamyshev, Russia. E-mail: motor_da@mail.ru.

Ramil G. Mustafin – PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor Kazan state power university, Kazan, Russia. E-mail: ramil.mustafin@gmail.com.

Поступила в редакцию

11 декабря 2018 г.



АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАПАДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Н.С. Волотковская¹, А.С. Семёнов¹, О.В. Федоров²

¹СВФУ им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал) в г. Мирном,
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

²НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, sash-alex@yandex.ru

Резюме: В работе произведен анализ технического состояния сетевого оборудования Западных электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» за последние 10 лет. Показано географическое расположение сетей, обуславливающее масштабность исследования. Представлены технические показатели в интервале за 10 лет, свидетельствующие об увеличении объемов основных средств предприятия. Получены математические модели динамики износа электропередающего оборудования западных электрических сетей. Доказано, что техническое состояние оборудования будет в дальнейшем ухудшаться при отсутствии соответствующего финансирования.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), западные электрические сети, линия электропередачи, подстанция, износ оборудования, надежность, математическая модель, техническое состояние.

Благодарности: Работа выполнена в рамках конкурса проектов 2018 года фундаментальных научных исследований, проводимого РФФИ совместно с субъектами Российской Федерации, проект № 18-48-140016.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.

Для цитирования: Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Федоров О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей республики Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 46-55. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.

ANALYSIS OF STRUCTURE AND TECHNICAL CONDITION OF WESTERN ELECTRIC NETWORKS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

N.S. Volotkovskaya¹, A.S. Semenov¹, O.V. Fedorov²

¹ NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

² NNTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9940-3915>, sash-alex@yandex.ru

Abstract: The paper analyzes the technical condition of the network equipment of Western electric networks of PJSC «Yakutskenergo» for the last 10 years. The geographical location of the networks of the electric networks is shown, which determines the scale of the study.

Technical indicators in the interval of 10 years are presented, which testify to an increase in the volume of fixed assets of the enterprise. Mathematical models of the wear dynamics of the transmission equipment of the Western electric networks have been obtained. It is proved that the technical condition of the equipment will deteriorate further in the absence of appropriate financing.

Keywords: Republic of Sakha (Yakutia), Western Electric Networks, power line, substation, equipment wear, reliability, mathematical model, technical condition.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the competition for projects of 2018 of fundamental scientific research conducted by RFBR jointly with the subjects of the Russian Federation, project No. 18-48-140016.

For citation: N.S. Volotkovskaya, A.S. Semenov, O.V. Fedorov. Analysis of structure and technical condition of western electric networks of the republic of Sakha (Yakutia). *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 46-55. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-46-55.*

Введение

Повышение надежности работы электроэнергетических систем является одной из главных задач современной электроэнергетики. Решение этой задачи зависит от правильного подхода к организации своевременного оперативного обслуживания электрооборудования, от совершенства методов обоснованного принятия решений по техническому обслуживанию всей электроэнергетической системы [1]. Для этого необходимо всестороннее исследование нормальных и аварийных режимов работы электрических сетей и принятие мер по обеспечению их бесперебойного и надежного функционирования [2].

Исследованием оптимизации технического обслуживания, а также вопросов ремонта и диагностики электрических сетей в условиях севера занимались такие ученые, как Ю.З. Ковалева, Б.Г. Меньшова, М.С. Ершова, В.В. Сушкова, В.П. Фролова и другие представители научных школ [3].

Широкое внедрение электрической энергии в технологические процессы обуславливает все большую зависимость производства от надежности электроснабжения [4, 5]. Перерывы в подаче электричества из-за аварийных и внеплановых отключений, особенно в зимнее время или в условиях вечной мерзлоты, приводят к нарушению технологического процесса, выходу из строя оборудования, потерям продукции и денежных средств, а также к несчастным случаям на производстве [6].

В связи с этим все большую актуальность приобретают работы, направленные на исследование структуры и технического состояния передающего оборудования электрических сетей [7].

Основу электроэнергетики Республики Саха (Якутия) в настоящее время составляют электростанции и предприятия электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» с установленной мощностью в 2143 МВт, обеспечивающие 96–97% общей выработки электроэнергии и свыше 30% тепловой энергии в Республике. В структуре установленной мощности электростанций ГЭС занимают 37,5%. Централизованным электроснабжением в настоящее время охвачено около 36% территории, или 18 из 35 административно-территориальных делений, где проживает более 85% населения Республики. На базе этих энергетических мощностей сформированы четыре крупных изолированных энергорайона: Центральный, Западный, Южный и Северный. Площадь обслуживания электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» составляет 3,2 млн. кв. км.

В настоящее время основным источником электрической энергии и мощности для

Западного энергорайона являются ГЭС, расположенные на р. Вилюй: Вилюйская ГЭС (1 и 2 каскад) с установленной мощностью 680 МВт; Светлинская ГЭС с установленной мощностью 180 МВт. Кроме того, в отдельных населенных пунктах размещено еще несколько десятков мелких дизельных электростанций разной ведомственной принадлежности с распределением электроэнергии на напряжение 0,4–35 кВ, работающих изолированно.

Описание объекта исследования

Западные электрические сети (ЗЭС) обеспечивают электроснабжение потребителей западного энергорайона Республики Саха (Якутия), в том числе Мирнинского, Ленского и Вилюйской группы районов, в которую входят Сунтарский, Нюрбинский, Верхневилуйский, Вилюйский и часть Кобяйского районов. Воздушная линия Л-242 связывает Сунтар с Олекминском, который находится в Южно-Якутском энергорайоне, а двухцепная ВЛ-220 кВ связывает Талаканскую ГТЭС, расположенную на юге республики, с Иркутской энергосистемой. Также в состав предприятия ЗЭС входят резервные ДЭС в городах Нюрба, Вилюйск и Верхневилуйск.

В настоящее время основными крупными энергопотребителями являются алмазодобывающая отрасль и нефтеперекачивающие станции. Заметим, что последние 10 лет нефтеперерабатывающая и газодобывающая промышленности Западной Якутии активно развиваются. К наиболее крупным потребителям электроэнергии относятся такие потребители, как нефтеперегонные станции НПС-11,12,13,14 и предприятия АК «АЛРОСА» ПАО – Мирнинский, Айхальский и Удачинский ГОКи. Кроме того, будут подключены новые потребители (компрессорные станции КС-1,2) после окончания строительства и запуска газопровода «Сила Сибири».

Общая зона обслуживания объектов электрических сетей ЗЭС превышает 800 км. Расстояния между наиболее удалёнными объектами потребления и базами РЭС может составлять более 100 км, несмотря на оптимальные 40 км в соответствии с нормативно-технической документацией (НТД).

По состоянию на 01.01.2018 г. на балансе ЗЭС имеет 92 понизительные подстанции (ПС) 35–220 кВ, общей установленной мощностью 2790,49 МВА; ТП 6-10/0,4 кВ – 1447 шт., общей установленной мощностью 444,29 МВА; воздушные линии электропередачи (ВЛ) класса напряжения 0,4–220 кВ (по трассе) – 8729,1 км. Тогда как 10 лет назад [8–9], а именно по состоянию на 01.01.2008 г. на балансе ЗЭС находилось 89 ПС 35–220 кВ, общей установленной мощностью 2500 МВА; ТП 6–10/0,4 кВ – 1057 шт., общей установленной мощностью 110,81 МВА и ВЛ класса напряжения 0,4–220 кВ (по трассе) – 7607 км. В табл. 1 представлены более полные изменения показателей деятельности ЗЭС по состоянию за указанные выше года.

Таблица 1

Динамика технических показателей ЗЭС за последние 10 лет [10]

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Стояло на балансе 01.01.2008г.	Стоит на балансе 01.01.2018г.
1	Общая протяжённость ВЛ, в том числе:	км	7607	8729,1
1.1	220 кВ	км	1344	1149,3
1.2	110 кВ	км	1517	1530,6
1.3	35 кВ	км	1325	1437,1
1.4	10 кВ	км	1715	2103,9
1.5	6 кВ	км	279	374,4
1.6	0,4 кВ	км	1427	2133,8
2	Общее кол-во и мощность ПС, в том числе:	шт./МВА	84/2571,2	92/2790,49

Продолжение таблицы 1

2.1	220 кВ	шт./МВА	5/1031	5/1015
2.2	110 кВ	шт./МВА	43/1500	38/1522,3
2.3	35 кВ	шт./МВА.	40/234	49/253,19
3	Общее кол-во и мощность ТП, в том числе:	шт./МВА	1037/318	1447/444,29
3.1	Комплектные (КТП)	шт./МВА	56/33,89	1300/335,70
3.2	Закрытые (ЗТП)	шт./МВА	43/76,92	123/105,26
3.3	Мачтовые (МТП)	шт./МВА	-	24/3,33

Примечание: указанная протяженность линий соответствует данным ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго», без учета линий, находящихся в аренде и совместном пользовании согласно годовому отчету ПАО «Якутскэнерго».

Географическое расположение Западного энергорайона ПАО «Якутскэнерго» с нанесением ВЛ-220–110 кВ и основных ПС показано на рис. 1, где сплошные зеленые линии – ВЛ-220 кВ, сплошные черные – ВЛ-110 кВ, пунктирные зеленые линии – проектируемые ВЛ-110–220 кВ.

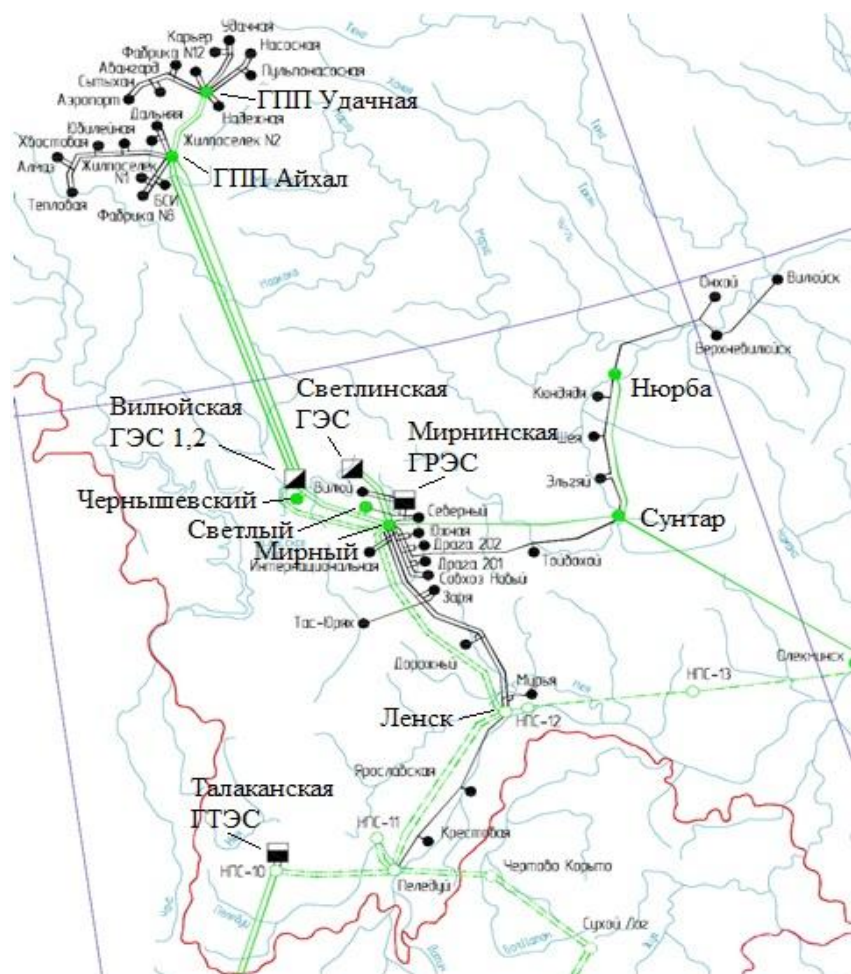


Рис. 1. Географическое расположение районных сетей ЗЭС

Описание проблемы исследования

Современное развитие промышленности Западно-Сибирского региона ведет к росту технических показателей ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго»: увеличению количества и мощностей подстанций различных уровней напряжения, а также общей протяженности линий электропередачи.

Анализ аварийных отключений по причинам выхода из строя электрооборудования на примере ПАО «Якутскэнерго» показал:

- недостатки технической эксплуатации – 4%;
- дефекты монтажа, наладки – 3%;
- недостатки проекта, конструкции – 1%;
- старение оборудования, износ изоляции – 31%;
- атмосферные и природные воздействия – 28%;
- по вине сторонних организаций – 16%;
- прочие – 17%.

При планировании проведения ремонта и мероприятий по технической реконструкции сетевого оборудования в ЗЭС выполняется большой объем работ по диагностике и визуальному осмотру оборудования. Для определения методов и сроков проведения ремонтных работ все оборудование делится на группы по техническому состоянию (% износа): от хорошего технического состояния оборудования (20% износа) до критического (более 80%) – всего на пять групп.

Для определения эксплуатационного состояния основных средств ЗЭС определяется индекс технического состояния. Расчет этого индекса производится по специальной методике в соответствии с проектом Приказа Минэнерго России [11]. Величина, обратная индексу технического состояния, является износом оборудования в процентах, в соответствии с которым оборудование группируется для определения метода и сроков проведения ремонтных работ.

В ЗЭС, как и во всем ПАО «Якутскэнерго», основная часть ВЛ выполнена на деревянных опорах и в процентном соотношении составляет примерно:

- на деревянных опорах – 92%;
- на металлических опорах – 7%;
- на железобетонных опорах – 1%.

При этом на основании обработки, анализа и обобщения статистических данных по электрическим сетям ПАО «Якутскэнерго» определено, что удельное число отказов воздушных линий электропередачи на 1 км в год составляет:

- на деревянных опорах – 3%;
- на железобетонных опорах – 13%;
- на опорах из металлических труб – 10%.

Исходя из максимального срока службы опор 25–30 лет, необходимо, чтобы в состоянии степени изношенности 80% находилось одновременно не более 7–10% деревянных опор магистральных электрических сетей 35–220 кВ и не более 10–12% опор распределительных электрических сетей 6–10/0,4 кВ. Однако, анализ состояния деревянных опор показывает, что такие линии 220 кВ, как Л-203, 204, 206, и линии 110 кВ – Л-108, 109, 117, 119 эксплуатируются в «ухудшенном» состоянии и износ воздушных линий, так же как и степень изношенности оборудования подстанций, с каждым годом увеличивается [12].

Методика проведения исследования

Для описания динамики износа электрооборудования ЗЭС были разработаны математические модели на основе законов распределения наработки до отказа и применен пакет программ *MatLab* для проведения математических расчетов и аппроксимации эмпирических функций.

Выбор закона распределения, в значительной мере, процедура неопределенная и во

многое субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы. Очевидно, что выбор распределения будет зависеть, прежде всего, от вида эмпирической функции плотности распределения отказов $f(t)$, а также от вида функции интенсивности отказов $\lambda(t)$. Для оценки надежности энергетических объектов широко применяется экспоненциальный закон распределения. Однако в нашем случае речь идет о «стареющих» объектах, подвергающихся износу. В связи с этим выбираем логарифмически нормальный закон распределения, который описывает наработку до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости [13,14].

Если величина $\lg(t)$ имеет нормальное распределение с параметрами математического ожидания (МО) U и среднего квадратичного отклонения (СКО) V , то величина T считается логарифмически нормально распределенной с плотностью распределения отказа, описываемой формулой:

$$f(t) = \frac{1}{V \cdot t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{\lg(t)-U^2}{2V^2}\right)}.$$

Параметры U и V по результатам статистических данных принимаются равными:

$$U \approx \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \lg(t_i), \quad V \approx \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\lg(t_i) - U)^2.$$

Числовые характеристики, такие как средняя наработка до отказа и её дисперсия, будут соответственно равны:

$$T_0 = e^{\left(U + \frac{V^2}{2}\right)}, \quad D = e^{(2U+V^2)} \cdot (e^{V^2} - 1).$$

Выбранный закон распределения был применен к статистическим данным технического состояния электрооборудования ЗЭС за последние 5 лет (2013–2017 гг.). Вычисления производились в пакете программ *MatLab*, хорошо зарекомендовавшем себя в математических и инженерных расчетах [15].

Результаты исследования

Исходными данными для построения математических моделей являются данные, представленные на рис. 2, где показано увеличение износа основного оборудования ЗЭС соответственно за период 2013–2017 гг. При этом, если износ всех основных фондов колеблется, что указывает на их своевременную частичную модернизацию или капитальный ремонт, то износ ВЛ и оборудования подстанций только растет [16].

В пакете программ *MatLab* на основе проанализированных данных были получены три математические модели (аппроксимированные функции), описывающие динамику износа ВЛ, подстанций и передающего оборудования (рис. 3), две из которых имеют линейную зависимость, а одна – полиномиальную. Для линейных зависимостей МО и СКО соответственно равны:

- для ВЛ: $y = 2,16x + 58,08$; $R^2 = 0,9997$;

- для передающего оборудования: $y = 2,84x + 52,54$; $R^2 = 0,9907$;

Для полиномиальной зависимости износа оборудования подстанций МО и СКО определяются следующими функциями: $y = -0,3x^3 + 3,8714x^2 - 6,9286x + 32,14$; $R^2 = 0,9991$.

Из показанных на рис.3 математических моделей следует, что динамика износа основных средств имеет положительную тенденцию. Рост износа составляет в среднем за год:

- по ВЛ напряжением 110 кВ и выше – 2,2% в год;

- по оборудованию ПС напряжением 110 кВ и выше – 6,3% в год.

Полученные математические модели, описывающие динамику износа электрооборудования ЗЭС, указывают с вероятностью 95% на то, что изнашиваемость данного оборудования будет из года в год только расти [17–20].

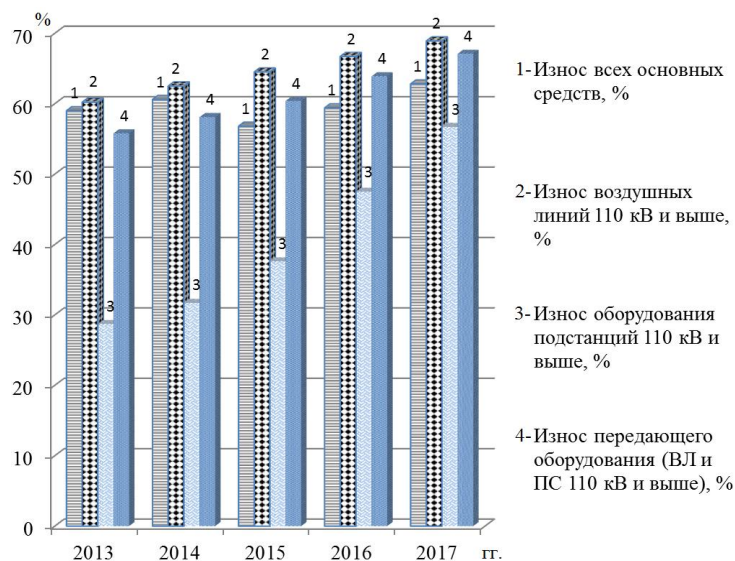


Рис. 2. Анализ износа основных средств ЗЭС

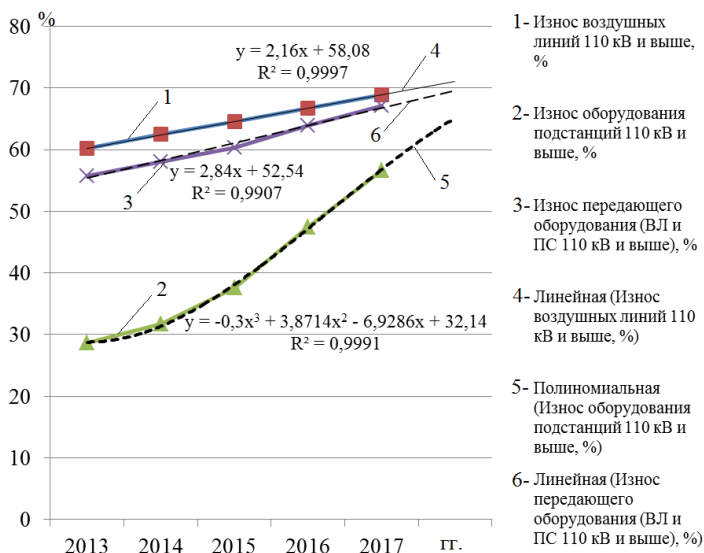


Рис. 3. Математические модели динамики износа электрооборудования ЗЭС

Заключение

В результате проделанной работы был произведен анализ технического состояния электрооборудования западных электрических сетей. Приведены статические данные по износу ВЛ, оборудования ПС и передающего оборудования ЗЭС за 5 лет. Построены математические модели, описывающие динамику износа электрооборудования, которая носит положительный характер.

Существующий уровень затрат на техническое обслуживание и ремонт ВЛ и оборудование ПС напряжением 110 кВ и выше в ЗЭС (филиал) ПАО «Якутскэнерго» не обеспечивает своевременное восстановление работоспособности энергопередающего оборудования и снижение износа этих основных средств. Увеличение затрат на техническое обслуживание и ремонт в существующих тарифных решениях на

электроэнергию в данном регионе не представляется возможным.

Если в ближайшие годы не принять необходимые меры по ремонту и восстановлению основных средств ЗЭС, то с вероятностью 95% оборудование подстанций 110 кВ к 2023 году полностью выйдет из строя.

Литература

1. Китушин В.Г., Иванова Е.В. Планирование ремонтного обслуживания и замены оборудования электрических сетей с учетом фактора надёжности // Проблемы управления. 2011. № 5. С. 46–51.
2. Khudyakov V.V. Increasing the reliability of electric networks // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82, is. 9. Pp. 455–459. DOI: 10.3103/S1068371211090070.
3. Басырова Т.Д., Сушков В.В., Плюхин П.С. Исследование надежности нефтепромысловых электрических сетей при различных стратегиях технических обслуживаний и ремонта / Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (16-18 мая 2007 г.). Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2007. С.19–23.
4. Фёдоров О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 3 (30). С. 30–33.
5. Федоров О.В., Дарьенков А.Б. Энергосберегающая политика: монография. М.: Издательство «КНОРУС», 2015. – 294 с.
6. Кронгауз Д.Э. Оценка ущербов от перерывов в электроснабжении потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 54–56.
7. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 1-2. С. 95–101.
8. Волотковская Н.С. Структура и основные технические показатели ЗЭС / Научная молодежь и промышленность: Сб. докл. и тез. М.: Компания «Спутник +», 2007. С. 106–109.
9. Волотковская Н.С. Структура и основные технические показатели Западных ЭС Якутии / Исторические корни и перспективы развития западного региона Якутии: Сб. докл. и тез. регион. науч.- практ. конф. М.: Компания «Спутник +», 2007. С. 149–151.
10. [Электронный ресурс] Рязанцева Г.А., Ефремов Н.Г., Волотковская Н.С. Современное техническое состояние и дальнейшее развитие западных электрических сетей Якутии / Студенческий научный форум 2018: Материалы X Международной студенческой электронной научной конференции. Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2018/3000/4437> (дата обращения: 17.05.2018).
11. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». Зарег. в Минюсте РФ 05.10.2017 г. № 48429.
12. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 53–63.
13. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
14. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: «Наука», 1965. 524 с.
15. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56–64. DOI: 10.17513/snt.36780.
16. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Садыков Р.Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // Надежность

и безопасность энергетики. 2017. Т. 10, № 1. С. 48–52.

17. Malafeev A., Iuldasheva A. Short-circuit failures simulation for evaluation of structural reliability of power supply systems // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 129. Pp. 433–439. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.145.

18. Rao M.M., Thomas M.J., Singh B.P. Transients induced on control cables and secondary circuit of instrument transformers in a GIS during switching operations // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22, Is. 3. Pp. 1505–1513. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.901292.

19. Roser M., Stumberger G. Improving the power supply reliability in resonant earthed systems by fault current path control established through faulted phase earthing switch // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 64. Pp. 714–722. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.068.

20. Ustinov D.A., Baburin S.V. Synthesis procedure of the power supply systems topology at mineral resource enterprises based on logical-probabilistic assessments // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, Is. 9. Pp. 6402–6406.

Авторы публикации

Волотковская Наталья Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета (СВФУ) имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: volotkovska_n@mail.ru.

Семёнов Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета (СВФУ) имени М.К. Аммосова в г. Мирном. E-mail: sash-alex@yandex.ru.

Федоров Олег Васильевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) имени Р.Е. Алексеева. E-mail: fov52@mail.ru.

References

1. Kitushin V.G., Ivanova E.V. // *Problemy Upravleniya*. 2011. № 5. Pp. 46–51.
2. Khudyakov V.V. // *Russian Electrical Engineering*. 2011. Vol. 82, is. 9. Pp. 455–459. DOI: 10.3103/S1068371211090070.
3. Basyrova T.D. Sushkov V.V. Plyuhin P.S. Issledovanie nadezhnosti neftepromyslovyyh ehlektricheskikh setej pri razlichnykh strategiyah tekhnicheskikh obsluzhivaniy i remonta / *Problemy ehlektrotekhniki, ehlektroehnergetiki i ehlektrotekhnologii: Trudy II Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (16-18 maya 2007 g.)*. CH. 1. – Tol'yatti: TGU, 2007. Pp. 19–23.
4. Fedorov O.V. // *Reliability and safety of energy*. 2015. № 3 (30). Pp. 30–33.
5. Fedorov O.V., Daryenkov A.B. *Energy saving policy: monograph*. – Moscow: Publishing House "Knorus", 2015. – 294 p.
6. Krongauz D.Eh. // *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2017. № 6 (45). Pp. 54–56.
7. Gracheva E.I., Sadykov R.R. // *Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems*. 2017. V. 19, № 1-2. Pp. 95–101.
8. Volotkovskaya N.S. *Struktura i osnovnye tekhnicheskie pokazateli WES / Nauchnaya molodezh' i promyshlennost': Sb. dokl. i tez.* – M.: Kompaniya "Sputnik +", 2007. Pp. 106–109.
9. Volotkovskaya N.S. *Struktura i osnovnye tekhnicheskie pokazateli Zapadnyh ES Yakutii / Istoricheskie korni i perspektivy razvitiya zapadnogo regiona YAKutii: Sb. dokl. i tez. region. nauch.-prakt. konf.* – M.: Kompaniya "Sputnik +", 2007. Pp. 149–151.
10. [Electronic resource] Ryazanceva G.A., Efremov N.G., Volotkovskaya N.S. *Sovremennoe*

tekhnicheskoe sostoyanie i dal'nejshee razvitie zapadnyh ehlektricheskikh setej YAkutii / Studencheskij nauchnyj forum 2018: Materialy X Mezhdunarodnoj studencheskoj ehlektronnoj nauchnoj konferencii. Access mode: <http://www.scienceforum.ru/2018/3000/4437> (date of the application: 17.05.2018).

11. Prikaz Ministerstva ehnergetiki Rossijskoj Federacii ot 26.07.2017 № 676 “Ob utverzhdenii metodiki ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i liniy ehlektricheskikh stancij i ehlektricheskikh setej”. Zareg. v Minyuste RF 05.10.2017 № 48429.

12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2016. № 1-2. Pp. 53–63.

13. Reliability of technical systems: reference book / Yu.K. Belyaev, V.A. Bogatyrev, V.V. Bolotin and others; Ed. I.A. Ushakov. – Moscow: Radio and Communication, 1985. – 608 p.

14. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Soloviev A.D. Mathematical methods in reliability theory. – Moscow: Nauka, 1965. – 524 p.

15. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Mathematical modeling of technical systems in MATLAB // Modern high technologies. 2017. № 8. Pp. 56–64. DOI: 10.17513/snt.36780.

16. Gracheva E.I., Safin A.R., Sadykov R.R. // Safety & Reliability of Power Industry. 2017. V. 10, № 1. Pp. 48–52.

17. Malafeev A., Iuldasheva A. // Procedia Engineering. 2015. V. 129. Pp. 433–439. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.145.

18. Rao M.M., Thomas M.J., Singh B.P. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, Is. 3. Pp. 1505–1513. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.901292.

19. Roser M., Stumberger G. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. V. 64. Pp. 714–722. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.07.068.

20. Ustinov D.A., Baburin S.V. // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11, № 9. Pp. 6402–6406.

Authors of the publication

Natalia S. Volotkovskaya – PhD in Engineering sciences, Associate Professor NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny, Mirny, Russia. E-mail: volotkovska_n@mail.ru.

Alexander S. Semenov – PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor, Head the Department NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic institute (branch) in Mirny, Mirny, Russia. E-mail: sash-alex@yandex.ru.

Oleg V. Fedorov – Grand PhD in Engineering sciences, Professor NNTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: fov52@mail.ru.

Поступила в редакцию

07 августа 2018 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНКА-КАЧАЛКИ

Р.Ф. Ярыш¹, А.Р. Гарифуллина², Р.И. Гарифуллин³, А.Н. Якунин²

¹Казанский государственный энергетический университет

²Альметьевский государственный нефтяной институт

³Инженерный центр ПАО «Татнефть»

ar.garifullina@yandex.ru

Резюме: Проанализированы режимы работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки с использованием динамограмм, ваттметрграмм и математической модели станка-качалки, определено влияние формы динамограммы на режим работы электродвигателя станка-качалки. Выполнено сравнение способов защиты вентиля в составе преобразователя частоты от повышения напряжения при переходе двигателя в генераторный режим.

Ключевые слова: станок-качалка, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, генераторный режим, тормозной резистор, функция предотвращения рекуперации.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

Для цитирования: Ярыш Р.Ф., Гарифуллина А.Р., Гарифуллин Р.И., Якунин А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 56-64. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF PUMPJACK

R.F. Yarish¹, A.R. Garifullina², R.I. Garifullin³, A.N. Yakunin²

¹Kazan State Power Engineering University,

²Almetyevsk State Oil Institute,

³Engineering center of PJSC «Tatneft»

Abstract: The analysis of the operating modes of the frequency-controlled electric drive of the pumpjack with the use of dynamometer cards, wattmeter diagrams and the mathematical model of the pump-jack, the effect of the shape of the dynamometer card on the operating mode of the electric motor of the pumpjack is determined. The ways of protection of the transistors in the frequency converter from voltage increase are considered at the transition of the electric motor to the regeneration.

Key words: pumpjack, frequency converter, induction motor, power regeneration, braking resistor, regeneration avoidance function.

For citation: R.F. Yarish, A.R. Garifullina, R.I. Garifullin, A.N. Yakunin. Investigation of operating modes of frequency-regulated electric drive of pumpjack. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 56-64. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

На нефтяных месторождениях в поздней стадии эксплуатации существуют проблемы изменения забойных давлений в скважинах из-за циклической (сезонной) закачки воды в целях поддержания пластового давления. Это требует изменения параметров наземного привода (числа качаний) установки штангового глубинного насоса (УШГН). Число качаний УШГН изменяют:

- заменой шкива на двигателе;
- заменой двигателя на двигатель с иной скоростью вращения;
- изменением частоты напряжения на статоре двигателя с помощью преобразователя частоты (ПЧ).

Замена шкивов требует выезда ремонтной бригады, что в зимних условиях связано с расчисткой дороги и, как следствие, высокими эксплуатационными расходами. Замена двигателя связана со значительными капитальными вложениями и эксплуатационными расходами.

Наиболее приемлемым способом изменения числа качаний является применение частотного регулирования электропривода УШГН, которое может осуществляться переносным или стационарным преобразователем частоты [1]. Изменение параметров наземного привода с помощью переносных, так называемых «реанимационных», ПЧ не позволяет предприятию избежать финансовых потерь, связанных с простоем скважины во время перенастройки привода, затратами на обеспечение подъездных путей и затратами на подключение ПЧ.

В связи с этим целесообразно внедрение на таких «проблемных» скважинах стационарных ПЧ в составе станции управления УШГН.

Большинство УШГН приводится в действие наземным приводом в виде станка-качалки (СК). Станок-качалка – установка добычи нефти, сочетающая в себе свойства насосной установки и подъемного механизма. Практика внедрения ПЧ показала, что применение ПЧ на подъемных механизмах связано с проблемой возникновения генераторного режима, который обычно возникает при спуске груза.

Для анализа режимов работы электропривода СК рассмотрена кинематическая схема СК (рис. 1), по которой составлена математическая модель механической части СК.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $P_{СКВ}$ – сила, действующая в точке подвеса штанг (ТПШ) со стороны скважины; $P_{ГР}$ – сила веса грузов; $F_{Ш}$ – усилие в шатуне; $F_{СКВ}$ – тангенциальная составляющая силы, действующей на кривошип со стороны скважины; $F_{ГР}$ – тангенциальная составляющая силы веса грузов; $r_{бл1}$ – переднее плечо балансира; $r_{бл2}$ – заднее плечо балансира; $r_{кр}$ – радиус кривошипа; $r_{ГР}$ – радиус центра тяжести расположения противовесов на кривошипах; $B(x_B, y_B)$ – точка сочленения шатуна с балансиром и её координаты в плоскости $x-y$, начало координат которой совмещено с осью кривошипа; $K(x_K, y_K)$ – точка сочленения шатуна с кривошипом и её координаты.

Кинематическая схема СК включает кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение электродвигателя в возвратно-поступательное движение колонны штанг с плунжерным насосом. При ходе плунжера вверх в ТПШ к балансиру 1 прикладывается сила $P_{СКВ}$, обусловленная, в основном, весом штанг и столба жидкости. Эта сила посредством шатуна 2 передается на кривошип 3 и создаёт момент сопротивления, который преодолевается электродвигателем 5.

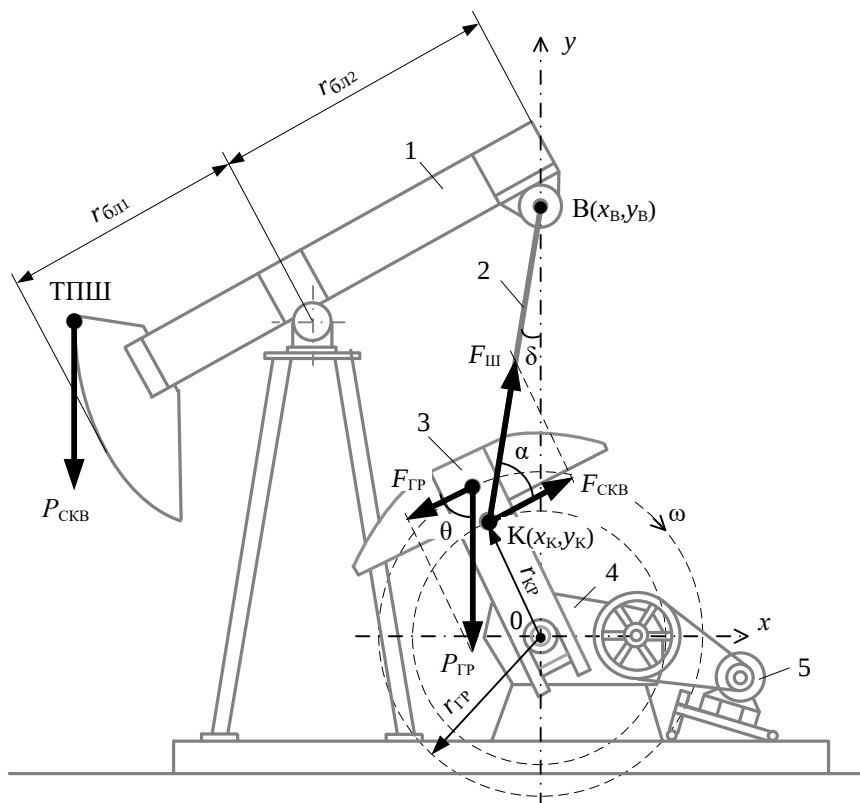


Рис. 1. Кинематическая схема станка-качалки:

1 – балансир; 2 – шатун; 3 – кривошип; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель

При ходе плунжера вниз нагрузка в точке подвеса штанг действует в направлении движения и разгружает электродвигатель. На каждом станке-качалке имеются противовесы для уравнивания нагрузки, действующей в ТПШ. Противовесы создают на кривошипе силу $P_{гр}$, которая действует против силы $P_{скв}$. При правильном уравнивании СК нагрузки приводного электродвигателя при ходе плунжера вверх и вниз примерно одинаковы. При недостаточном весе уравнивающего груза момент сопротивления на электродвигателе при ходе плунжера вниз может стать отрицательным, и двигатель переходит в генераторный режим [2, 3].

Усилие в шатуне определяется по правилу равновесия для рычага:

$$F_{\text{III}} = \frac{P_{\text{СКВ}} \cdot r_{\text{бл1}}}{\cos \delta \cdot r_{\text{бл2}}},$$

где δ – угол отклонения шатуна от вертикали.

Момент, действующий на кривошип, определяется тангенциальными составляющими сил, действующих на вращающийся кривошип:

$$M_{\text{кр}} = F_{\text{сKB}} \cdot r_{\text{кр}} - F_{\text{Гр}} \cdot r_{\text{Гр}},$$

где $F_{\text{СКВ}} = F_{\text{Ш}} \cos \alpha$, α – угол между шатуном и перпендикуляром к кривошипу;

$$F_{\text{гр}} = P_{\text{гр}} \cos \theta, \theta - \text{угол между силой веса и перпендикуляром к кривошипу.}$$

Углы α , δ , θ находятся с помощью координат характерных точек кинематической схемы СК, определяемых при решении обратной задачи кинематики для кинематической схемы СК [4, 5].

Характер изменения нагрузки в ТПШ описывается с помощью динамограммы, которая представляет собой графическую зависимость нагрузки, действующей в ТПШ в течение насосного цикла, в функции координаты этой точки относительно самого нижнего её положения за цикл качания. Динамограмма образует замкнутую фигуру, размеры которой зависят от действующих усилий и длины хода полированного штока. При нормальной работе насоса динамограмма имеет форму параллелограмма [3, 6].

С целью определения влияния формы динамограммы на режим работы электродвигателя СК исследовано несколько «проблемных» скважин на различных нефтяных месторождениях Татарстана методом динамометрирования.

На рис. 2 показаны практические динамограммы двух разных скважин, оборудованных СК типа СК8-3,5-4000 с длиной хода 3,5 м. Верхняя ветвь динамограммы образуется при подъеме штанг, нижняя ветвь – при спуске. Эти практические динамограммы явились входными данными для математического моделирования режимов работы электропривода СК. На рис. 3 показаны соответствующие динамограммам кривые моментов сопротивления на валу двигателя в функции перемещения ТПШ за цикл, полученные математическим моделированием механической части СК.

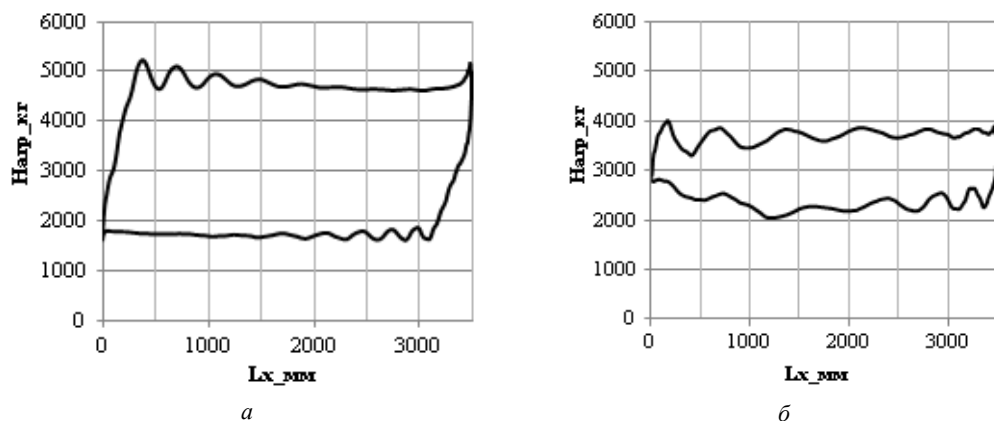


Рис. 2. Динамограммы нагрузок в ТПШ

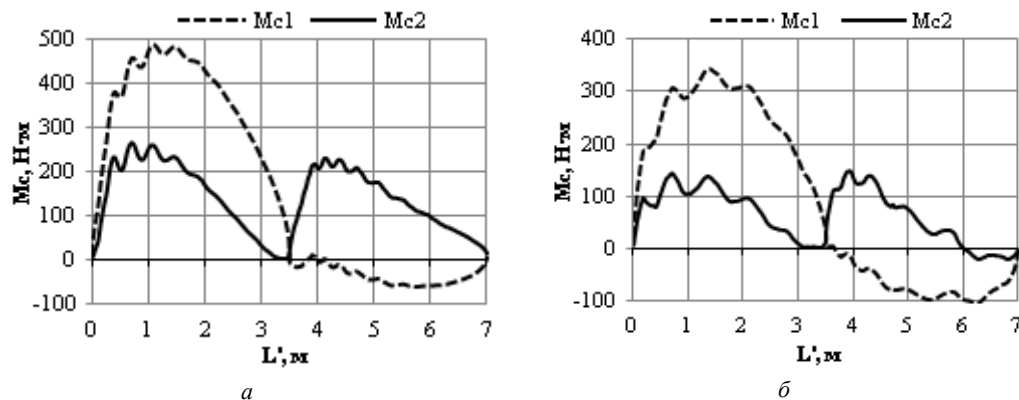


Рис. 3. Кривые момента на кривошипе

На рис. 3 пунктиром (M_{c1}) показаны кривые моментов, полученные при минимальном весе уравнивающего груза, сплошными линиями (M_{c2}) показаны кривые моментов при уравнивании, близком к полному.

Кривая момента сопротивления M_c на валу двигателя имеет такую же форму, как момент на кривошипе, отличаясь лишь масштабом за счет передаточного числа и КПД механической передачи (редуктора и ременной передачи):

$$M_c = \frac{M_{кр}}{i_{ред}i_{рем}\eta_{ред}\eta_{рем}} + M_{тр} \quad \text{— при положительном моменте на кривошипе,}$$

$$M_c = \frac{M_{кр}\eta_{ред}\eta_{рем}}{i_{ред}i_{рем}} + M_{тр} \quad \text{— при отрицательном моменте на кривошипе,}$$

где $M_{тр}$ — момент трогания (момент сухого трения) [7]; $i_{ред}$ — передаточное число редуктора;

$$i_{рем} = \frac{d_{шк.ред}}{d_{шк.рем}} \quad \text{— передаточное число ременной передачи; } d_{шк.ред}, d_{шк.дв} \text{ — диаметры}$$

шкивов редуктора и двигателя; $\eta_{ред}, \eta_{рем}$ — КПД редуктора и ременной передачи.

По кривой момента на валу двигателя можно судить о режиме его работы. Положительный момент свидетельствует о двигательном режиме, а отрицательный — о генераторном режиме работы. Как видно из рис. 2 и 3, на возникновение генераторного режима электродвигателя СК влияют уравнишенность СК и высота динамограммы.

Неуравнишенность СК (слишком малый вес груза) является причиной перехода двигателя в генераторный режим при любой нормальной динамограмме. В то же время полное или близкое к полному уравнивание не исключает возможности генераторного режима. Если динамограмма достаточно высокая, т.е. при существенной разнице между максимальной и минимальной нагрузками в ТПШ, как на рис. 2, а, уравнивание позволяет избежать генераторного режима (линия M_{c2} на рис. 3, а). Если разница между максимальной и минимальной нагрузками невелика, динамограмма имеет малую высоту (рис. 2, б), и даже при полном уравнивании генераторный режим будет иметь место в конце подъема или в конце спуска штанг (на рис. 3, б линия M_{c2} на интервале от 6 до 7 м — в конце спуска).

В генераторном режиме электрическая машина вырабатывает электрическую энергию. Обычные преобразователи частоты не могут передавать вырабатываемую электрической машиной энергию в сеть, так как не имеют в своей схеме инвертирующего звена, которое могло бы провести поток энергии из цепи постоянного тока ПЧ в трехфазную сеть (рис. 4). При переходе электродвигателя в генераторный режим вырабатываемая им энергия накапливается в виде высокого потенциала на шинах постоянного тока ПЧ, что может привести к пробоем полупроводниковых вентилях и выходу ПЧ из строя.

Для исключения возможности повышения напряжения применяют два способа [8]:

- 1) включение тормозного резистора к шинам постоянного напряжения ПЧ;
- 2) программная подстройка частоты.

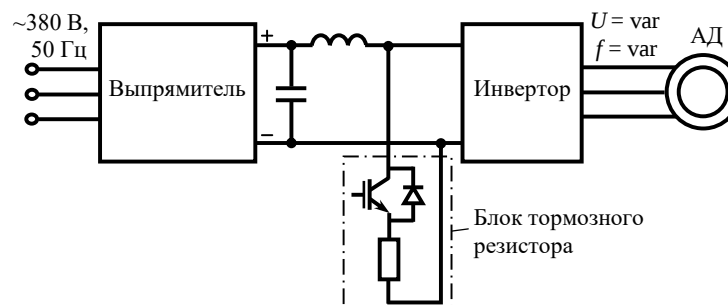


Рис. 4. Схема преобразователя частоты

В схеме с тормозным резистором при превышении заданного значения напряжения на шинах постоянного тока транзистор блока тормозного резистора открывается и позволяет провести через резистор обратный ток электродвигателя, вся вырабатываемая энергия рассеивается в виде тепла на тормозном резисторе.

Программная подстройка частоты – при возникновении обратного тока ПЧ повышает выходную частоту так, чтобы скорость вращения магнитного поля машины стала чуть больше скорости вращения ротора. Таким способом не допускается переход электродвигателя в генераторный режим. В каталоге фирмы *Mitsubishi Electric* [8], которая является одним из флагманов в производстве ПЧ, такая подстройка частоты называется функцией предотвращения рекуперации (ФПР). *Mitsubishi Electric* предлагает использовать эту функцию для механизмов с переменным моментом, таких как вентиляторы, насосы, воздуходувки.

Недостатками первого способа являются дороговизна и большие габариты тормозного резистора. При большой мощности торможения для него приходится устанавливать отдельный шкаф. Кроме того, наличие тормозного резистора приводит к увеличению потребления электроэнергии. Второй способ не требует дополнительных вложений.

Существуют также рекуперирующие ПЧ, имеющие в своем составе дополнительный инвертирующий комплект вентиля [8, 9]. Однако в настоящее время такие ПЧ весьма дороги, их стоимость в несколько раз превышает стоимость обычных нерекуперирующих ПЧ.

Исследование с помощью ваттметрграмм СК «проблемных» скважин позволило выявить, в каких режимах в действительности работают электродвигатели СК. На рис. 5 показаны ваттметрграммы работы СК от ПЧ с тормозным резистором и от ПЧ с ФПР за два цикла качания. Двигательному режиму работы соответствуют положительные значения мощности, генераторному – отрицательные. В данном случае генераторный режим электродвигателя возникает в конце хода вниз. Наличие тормозного резистора обеспечивает двигателю свободный переход от двигательного режима к генераторному и обратно. При включении ФПР возникновение генераторного режима исключается, вместо этого двигатель работает в режиме, близком к холостому ходу. ФПР приводит к уменьшению длительности цикла качания, в данном случае приблизительно на 1 с.

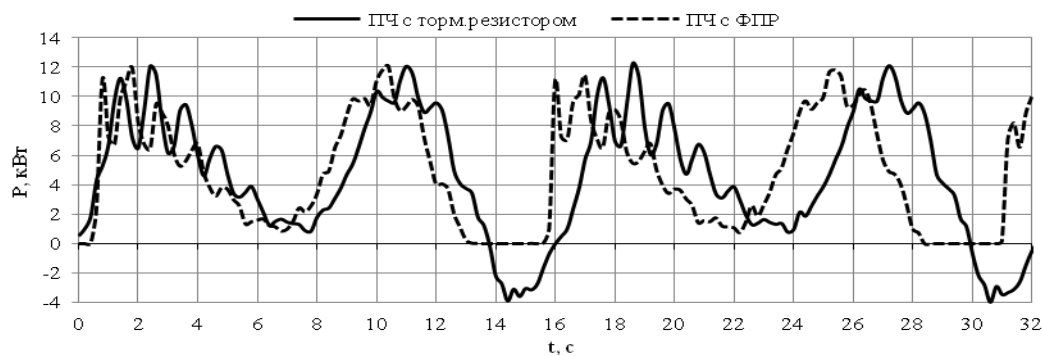
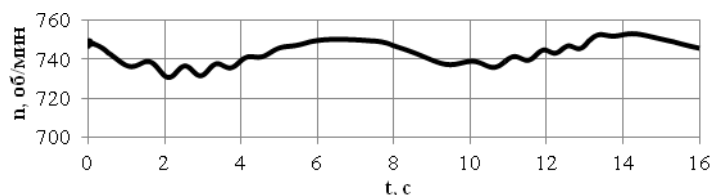
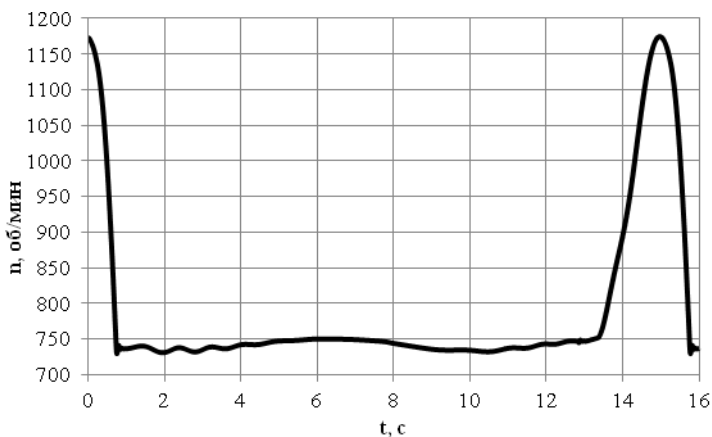


Рис. 5. Ваттметрgramмы работы СК

Если в генераторном режиме электромагнитный момент машины оказывает на ротор тормозящее действие, то в режиме работы с ФПР электромагнитный момент близок к нулю, но остается вращающим. Таким образом, в конце хода штока вниз, когда происходит торможение колонны штанг, ставший отрицательным момент сопротивления и электромагнитный момент разгоняют двигатель. Это приводит к более резкому торможению, а затем, в начале хода вверх, к такому же резкому ускорению колонны штанг, возникают динамические удары в конструкции СК. Математическое моделирование электромагнитных и механических процессов, происходящих в электроприводе СК, показало, что скорость ротора при включении ФПР на мгновение может достигать значения 1170 об/мин, при том что номинальная скорость двигателя 720 об/мин (рис. 6, б). Такие резкие ускорения двигателя приводят к появлению дополнительных инерционных усилий во всех элементах СК [10].



а



б

Рис. 6. График изменения скорости электродвигателя СК за цикл качания:
а – при работе от ПЧ с тормозным резистором; б – при работе от ПЧ с ФПР

Выводы

1. Приводные электродвигатели СК работают с периодически изменяющимся моментом на валу, при определенных условиях переходя в генераторный режим; на режим работы электродвигателя влияют уравнишенность СК и амплитуда нагрузок в ТПШ (высота динамограммы).

2. ФПР имеет существенные недостатки при использовании на СК со знакопеременной нагрузочной диаграммой: во-первых, уменьшение длительности цикла, что делает невозможным обеспечение требуемого по расчету числа качаний СК; во-вторых, увеличение инерционных усилий во всех элементах СК, приводящее к уменьшению временного ресурса работы оборудования.

3. ПЧ с тормозным резистором делает возможным рекуперативное торможение, благодаря чему обеспечиваются практически равномерное вращение двигателя на протяжении всего цикла качания (рис. 6, а), и, соответственно, более благоприятные режимы эксплуатации оборудования.

4. ПЧ без тормозных резисторов с ФПР можно использовать только на СК, не подверженных периодическому воздействию знакопеременных моментов на двигателе; ФПР может применяться во избежание отключения СК при внезапных скачках нагрузки на штоке, однако длительная работа СК с периодическим включением этой функции нежелательна.

Литература

1. К вопросу оптимизации закона движения выходного звена привода скважинной штанговой насосной установки / В.Н. Ивановский, Н.В. Садчиков, С.К. Улюмджиев // Территория Нефтегаз. 2012. № 5. С. 86–91.
2. Архипов К.И., Попов В.И., Попов И.В. Справочник по станкам-качалкам. Альметьевск: Отдел оперативной полиграфии управления «ТатАСУнефть» АО «Татнефть», 2000 146 с.
3. Gabor Takacs. Sucker-Rod Pumping Handbook. 1st Edition. Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
4. Теория механизмов и механика машин :Учебник (8-е издание). / Под ред. Г.А. Тимофеева. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 568 с.
5. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009.
6. Адонин А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами. М.: Недра, 1979. 213 с.
7. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-методический комплекс. Offline версия 1.0. Челябинск, 1995-2011. файлов 489, ил.
8. Mitsubishi Electric. Семейство FR. Преобразователи частоты. Интеллектуальная техника приводов. Москва, 2014.
9. Сравнительный анализ динамических показателей разомкнутой и замкнутой систем электропривода станка-качалки / О.А. Лысова, В.П. Фрайштетер // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 8. С. 93–97.
10. Некоторые особенности динамического взаимодействия штанговой колонны и станка-качалки как однорядного кривошипно-шатунного механизма / И.Е. Ишемгузин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2014. № 1. С. 16–20.

Авторы публикации

Ярыш Равия Фоатовна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гарифуллина Алсу Радиковна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного нефтяного института.

Гарифуллин Роберт Иршатович – начальник отдела оптимизации энергоресурсов и сырья Инженерного центра ПАО «Татнефть».

Якунин Анатолий Николаевич – старший преподаватель кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Альметьевского государственного нефтяного института.

References

1. On the optimization of the law of motion of the output link of the drive of a downhole rod pump installation / V.N. Ivanovsky, N.V. Sadchikov, S.K. Ulyumdzhiyev // Territory of Neftegaz. 2012. No. 5. P. 86–91.
2. Arkhipov K.I., Popov V.I., Popov I.V. Handbook of pumpjacks. Almeteyevsk, Department of operative Polygraphy of "TatASUneft" JSC "Tatneft", 2000. 146 p.
3. Gabor Takacs. Sucker-Rod Pumping Handbook. 1st Edition. Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
4. Theory of mechanisms and mechanics of machines. Textbook (8th edition). Edited by G.A. Timofeev. Moscow: Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2016. 568 p.
5. Sakaev A.F. Systems and algorithms for energy-saving control of frequency-regulated electric drives of sucker rod pumping units. Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg, 2009.
6. Adonin A.N. Extraction of petroleum by sucker-rod pumps. M.: Nedra, 1979. 213 p.
7. Voronin S.G. The electric drive of flying machines: Educational-methodical complex. Offline version 1.0. Chelyabinsk, 1995-2011. Files 489, ill.
8. Mitsubishi Electric. FR-Family. Frequency converters. Intelligent drive technology Moscow, 2014.
9. Comparative analysis of dynamic parameters of open and closed systems of the electric pumping unit / O.A. Lysova, V.P. Frayshteter // News of the Higher Institutions. Mining Journal. . 2014. № 8. P. 93–97.
10. Some specific features of dynamic interaction of a rod string and a beam-pumping unit as a single-row crank mechanism / I.E. Ishemguzhin // Equipment and technologies for oil and gas complex. 2014. № 1. P. 16–20.

Authors of the publication

Raviya F. Yarish – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Department of Relay protection and automation of electric power systems, Kazan State Power Engineering University.

Alsu R. Garifullina – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Department of Automation and information technology, Almeteyevsk State Oil Institute.

Robert I. Garifullin – Head of the Energy Resources and Materials Optimization Department, Engineering Center of PJSC Tatneft.

Anatoly N. Yakunin – Senior Lecturer Department of Electric and heat power engineering, Almeteyevsk State Oil Institute.



УДК 629.125:551.521

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА БАЗЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АТЛАСОВ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Н.И. Москаленко, И.Р. Додов, Г.В. Каюмова, А.Р. Хаертдинова, М.С. Хамидуллина,
Е.Г. Шешуков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
utisey@gmail.com

Резюме: Рассматриваются высокотемпературные атласы параметров спектральных линий газовой фазы продуктов сгорания энергетических топлив и их применение для моделирования радиационных характеристик оптически активных ингредиентов и радиационного теплообмена в высокотемпературных структурно-неоднородных многокомпонентных средах. Обсуждаются модели полос поглощения для определения функций спектрального пропускания и их параметризация по результатам численного моделирования, выполненного путём прямых расчетов тонкой структуры спектров излучения (поглощения) с последующим их численным интегрированием. Результаты выполненных расчетов сопоставляются с данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: радиационный теплообмен, радиационные характеристики, функция спектрального пропускания, параметры спектральных линий, модели полос поглощения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-65-80.

Для цитирования: Москаленко Н.И., Додов И.Р., Каюмова Г.В., Хаертдинова А.Р., Хамидуллина М.С. Моделирование радиационных характеристик газовой фазы продуктов сгорания на базе высокотемпературных атласов параметров спектральных линий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 65-80. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-65-80.

MODELATION OF THE RADIATION CHARACTERISTICS OF THE GAS PHASE COMBUSTION PRODUCTS BASED ON HIGH TEMPERATURE ATLASES OF SPECTRAL LINE PARAMETERS

N.I. Moskalenko, I.R. Dodov, G.V. Kayumova, A.R. Khaertdinova, M.S. Khamidullina, E.G.
SHeshukov

Kazan state power-engineering university, Kazan, Russia
utisey@gmail.com

Abstract: High temperature atlases of spectral lines parameters of the combustion products of energy fuels and their use for modeling the radiation characteristics of the optically active ingredients and radiation heat transfer in high structurally inhomogeneous multicomponent media are considered. The model of the absorption bands to determine the functions of spectral transmission and parameterization according to the results of numerical modeling performed by

direct calculation of the fine structure of the emission (absorption) spectra, followed by their numerical integration. The results of the calculations are compared with the data of experimental studies.

Key words: radiation heat transfer, radiation characteristics, the spectral transmission function, the parameters of the spectral lines, the model of the absorption bands.

For citation: N.I. Moskalenko, I.R. Dodov, G.V. Kayumova, A.R. Khaertdinova, M.S. Khamidullina. Modelation of the radiation characteristics of the gas phase combustion products based on high temperature atlases of spectral line parameters. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 65-80. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-65-80.*

Введение

В настоящей работе обсуждаются разработки высокотемпературных атласов параметров спектральных линий поглощения (СЛП) и их применяемость для получения радиационных характеристик оптически активных газовых ингредиентов продуктов сгорания энергетических топлив. Базовой радиационной характеристикой является функция спектрального пропускания (ФСП), без знания которой невозможно решить задачи радиационного теплообмена как в природных (атмосферы планет), так и в антропогенно возмущенных высокотемпературных средах (камеры сгорания энергетических и энерготехнологических установок, автомобильных двигателей внутреннего сгорания). Значительное место занимают задачи радиационной пеленгации аэроносителей системами наземного и космического базирования, требующие для своей разработки сведений по ФСП атмосферы для источников селективного излучения, которые могут отличаться от ФСП для источников неселективного излучения и зависеть от температурного поля источников излучения и тонкой структуры спектра их излучения [1–2].

Высокотемпературный атлас параметров спектральных линий колебательно-вращательных (КВ) полос CO_2

Углекислый газ представляет особый интерес, так как является одним из основных поглощающих радиацию компонентов в атмосферах Земли, Марса, Венеры и играет важную роль в радиационном теплообмене в камерах сгорания энергетических и энерготехнологических агрегатов и турбореактивных двигателей.

Описанный ниже высокотемпературный атлас параметров СЛП колебательно-вращательных (КВ) полосах CO_2 базируется на результатах многолетних экспериментальных исследований, выполненных с высоким спектральным разрешением $\Delta=0,05\text{--}0,2\text{ см}^{-1}$ и средним разрешением $\Delta=0,5\div 5\text{ см}^{-1}$ в области спектра $0,5\text{--}25\text{ мкм}$. Разработанные спектральные установки описаны в работах [1, 2, 6-10].

ФСП $\tau_{\Delta\nu}$, где Δ – ширина спектрального интервала неоднородной по давлению и температуре газовой среды можно рассчитать по формуле

$$\tau_{\Delta\nu} = \frac{1}{\Delta} \int_{\Delta} \left\{ \exp \left[- \int_L \sum_i S_i [T(L)] b_i [P(L), T(L), \nu_i, \nu'] \rho(L) dL \right] \right\} d\nu', \quad (1)$$

если параметры СЛП (интенсивность S_i , контур b_i , центр ν_i для i -й линии), профили температуры $T(L)$, давления $P(L)$, концентрации $\rho(L)$ вдоль оптического пути L известны. Для углекислого газа положение центров СЛП любой КВ-полосы можно вычислить,

пользуясь правилами отбора для вращательного квантового числа [6] и учитывая, что энергия колебательных движений молекулы

$$E_0 = \sum_{i=1}^3 w_i V_i + \sum_{i \leq j}^3 X_{ij} V_i V_j + \sum_{i \leq j \leq k} Y_{ijk} V_i V_j V_k + g_{22} l^2, \quad (2)$$

а вращательная энергия

$$E_r = B_v J(J+1) - D_v J^2(J+1)^2. \quad (3)$$

В формулах (2), (3) V_i ($i = 1, 2, 3$), J – колебательные и вращательные и квантовые числа; l – квантовое число колебательного момента количества движения, связанное с вырожденным деформационным колебанием; v_2 ; w_i , X_{ij} , Y_{ijk} , g_{22} – колебательные, B_v , D_v – вращательные молекулярные постоянные:

$$B_v(V_1, V_2, V_3) = B_0 - \sum_{i=1}^3 \alpha_i V_i + \sum_{i \leq j}^3 \gamma_{ij} V_i V_j, \quad (4)$$

$$D_v(V_1, V_2, V_3) = D_i - \sum_{i=1}^3 \delta_i (V_i + \frac{q_i}{2}), \quad (5)$$

где q_i – степень вырождения. Колебательные и вращательные постоянные основных изотопов $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ даны в табл.1.

Таблица 1

Молекулярные постоянные КВ-спектра $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$

Изотопы	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	Изотопы	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$
w_1	1345,10	1345,13	1306,70	y_{333}	0,015	0,015	0,015
w_2	667,25	648,37	662,13	g_{22}	0,775	0,79	0,77
w_3	2361,71	2295,24	2344,03	$10^5 B_i$	39163,5	39163,5	36952,0
x_{11}	-3,63	-3,63	-3,42	$10^5 B_0$	39021	39025	36820
x_{12}	3,44	3,29	3,31	$10^5 \alpha_1$	120	120	100
x_{22}	-0,635	-0,64	-0,62	$10^5 \alpha_2$	-72	-70	-65
x_{23}	-12,51	-11,73	-12,32	$10^5 \alpha_3$	308,75	297	293
x_{13}	-19,28	-18,8	-18,58	$10^5 \gamma_{11}$	-2	-2	-2
x_{33}	-12,56	-11,77	-12,36	$10^5 \gamma_{12}$	-1,5	-1,5	-1,5
y_{111}	0,13	0,13	0,12	$10^5 \gamma_{22}$	0	0	0
y_{112}	-0,08	-0,08	-0,08	$10^5 \gamma_{13}$	2	2	2
y_{113}	0	0	0	$10^5 \gamma_{33}$	0,35	0,35	0,35
y_{122}	-0,07	-0,07	-0,07	$10^5 \gamma_{23}$	2	1	2
y_{123}	0,02	0,02	0,02	$10^8 D_i$	13,5	13,7	11,5
y_{222}	0,01	0,01	0,01	$10^8 \beta_1$	-0,02	-0,02	-0,02
y_{133}	0,07	0,07	0,07	$10^8 \beta_2$	-0,24	-0,24	-0,24
y_{223}	0	0	0	$10^8 \beta_3$	+0,06	+0,06	+0,06
y_{233}	0,01	0,01	0,01				

В связи с тем, что $2\nu_2 \approx \nu_1$, многие КВ-полосы и колебательные состояния молекулы CO_2 подвержены влиянию резонанса Ферми. Последнее приводит к смещению центров СЛП и перераспределению интенсивностей в резонирующих КВ-полосах. Методика расчета центров резонирующих полос рассмотрена в работе [11], а формулы для вычисления интенсивностей горячих полос в приближении гармонического осциллятора приведены в [4]. Учет влияния резонанса Ферми на интегральную интенсивность полос поглощения CO_2

рассмотрен в работе [4]. Интенсивность $S(J)$ СЛП с вращательным квантовым числом J'' для нижнего состояния определяется по формуле

$$S(J) = \frac{\nu}{\nu_0} F(J) S_v S_R / Q_R, \quad (6)$$

где

$$S_R = gL \exp[-E_R''/kT], \quad (7)$$

$$Q_R = \sum_i g_i (2J+1) \exp(-E_R''/kT), \quad (8)$$

$$E_R'' = B'' J''(J''+1) - D'' [J''(J''+1)]^2, \quad (9)$$

где S_v – колебательный фактор, определяющий интенсивность КВ-полосы; ν – положение СЛП; ν_0 – положение центра КВ-полосы; g – амплитудный множитель; E_R'' – вращательная энергия нижнего состояния; Q_R – статистическая сумма; L – фактор, определяющий силу вращательной линии, значения которого для различных ветвей и типов полос даны в [4].

Ранее интенсивности СЛП CO_2 вычислялись, как правило, в приближении жесткого волчка. В этом случае значение F -фактора, определяющего в формуле (6) влияние КВ-взаимодействия и резонансных эффектов на перераспределение интенсивностей СЛП по ветвям, равно единице, а величина S_v равна интегральной интенсивности S_u КВ-полосы.

При сильном влиянии КВ-взаимодействия $F[J] \neq 1$, а величина S_v значительно отличается (иногда в несколько раз) от величины S_u . Нами были измерены интенсивности S СЛП по методике [4] и определены зависимости $S(J)$ [8, 11]. Экспериментальные данные по $S(J)$, погрешность определения которых не превосходила 10%, использованы для нахождения зависимостей F -фактора от вращательных и колебательных квантовых чисел. При этом для количественного описания F в зависимости от J была использована полуэмпирическая формула [8, 11]:

$$F = 1 + a_1 m + a_2 m^2, \quad (10)$$

где для $\Delta l = 0$ $m = J''+1$, $m = -J''$ и $m = 0$ для R -, P - и Q -ветвей соответственно. Для $\Delta l = \pm 1$ $m = J''+1 \mp l''$, $m = -J'' \pm l''$ и $m = l''^2$. Параметры a_1 и a_2 определены из экспериментальных данных $S(J)$ для многих колебательных переходов с основного и возбужденных колебательных уровней [8, 11] и использованы при подготовке атласа СЛП.

Полуширины СЛП $\alpha(J)$ для столкновений молекул $\text{CO}_2 - \text{N}_2$, $\text{CO}_2 - \text{CO}_2$ также базируются на экспериментальных данных [8].

Для каждой области спектра в окрестности полос 15; 10,6; 4,8–5,2; 4,3; 3–3,3; 2,7; 2; 1,6; 1,4 мкм затабулирован упорядоченный по частоте входной массив параметров 36 тыс. линий, включая интенсивности $S_i(T_0)$, полуширины $\alpha_i(\text{CO}_2 - \text{CO}_2)$, $\alpha_i(\text{CO}_2 - \text{N}_2)$, высоты E'' нижнего уровня переходов CO_2 при температуре $T_0 = 900$ К.

Полученный набор параметров линий обеспечивает вычисление ФСП в диапазоне температур $T \leq 2200$ К. Перед включением в расчет ФСП по формуле (11) входные массивы параметров линий пересчитываются на интересующую температуру и подвергаются фильтрации с целью сокращения массива линий и времени вычисления ФСП. Фильтрация выполняется по соотношению в интенсивности линий относительно наиболее сильной линии поглощения в узких интервалах спектра $\Delta = 5 \div 10 \text{ см}^{-1}$. Размерность использованного массива линий при вычислении ФСП зависит от температуры и давления смеси газов. Так, при $T \leq 300$ К для выполнения расчетов ФСП с погрешностью не более 1% необходимо использовать от $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^3$ линий в зависимости от полосы и давления в среде.

Программа по расчету ФСП методом прямого интегрирования состоит из трех независимых программ. Первая программа выполняет расчет коэффициентов поглощения для фиксированного давления и температуры, осуществляя их запись на магнитный носитель. По второй программе производится расчет ФСП одновременно для различных содержаний $w_1\text{CO}_2$ при фиксированных температуре и давлении для высокого разрешения. Третья программа предназначена для расчетов ФСП при среднем и низком разрешении $\Delta \geq 1 \text{ см}^{-1}$. Аппаратная функция $\delta(\nu - \nu_0)$ задается в численной форме и может быть произвольной.

С целью проверки правильности параметров линий выполнены расчеты коэффициентов поглощения $K_{\Delta\nu}$, определяющих интенсивность линий для узких интервалов спектра $\Delta = 5 \div 10 \text{ см}^{-1}$. Сопоставления показали, что при температуре $T = 300 \div 400 \text{ K}$ вычисленные и измеренные коэффициенты поглощения хорошо согласуются в пределах погрешности эксперимента, составляющий 5–10%. С ростом температуры расхождения измеренных и вычисленных коэффициентов поглощения увеличиваются и при $T = 2000 \text{ K}$ в крыльях полос достигают 100%. В будущем предполагается корректировку интенсивностей линий для слабых горячих полос провести путем подгонки вычисленных при повышенных температурах спектров поглощения к измеренным [1, 2, 8].

Нами выполнены расчеты ФСП в различных полосах поглощения углекислого газа для контролируемых лабораторных условий измерения при высоком $\Delta = 0,06 \div 0,2 \text{ см}^{-1}$ и среднем $\Delta = 1 \div 5 \text{ см}^{-1}$ разрешениях для температуры $T = 296 \text{ K}$. Для большинства спектральных интервалов (рис. 1) отклонения измеренных и вычисленных спектров поглощения составляют 2–3% при средней ошибке 2,3% для полос 15 и 4,3 мкм. Однако в окрестности Q-ветвей, где ФСП имеет сложную структуру, в отдельных случаях погрешности достигают 5–7%. Последнее может быть обусловлено отклонениями действительной аппаратной функции от принятой в расчетах. При высоких температурах параметры СЛП перенормируются на измеренные спектральные коэффициенты поглощения, зависящие от температуры для сохранения высокой точности вычисления ФСП.

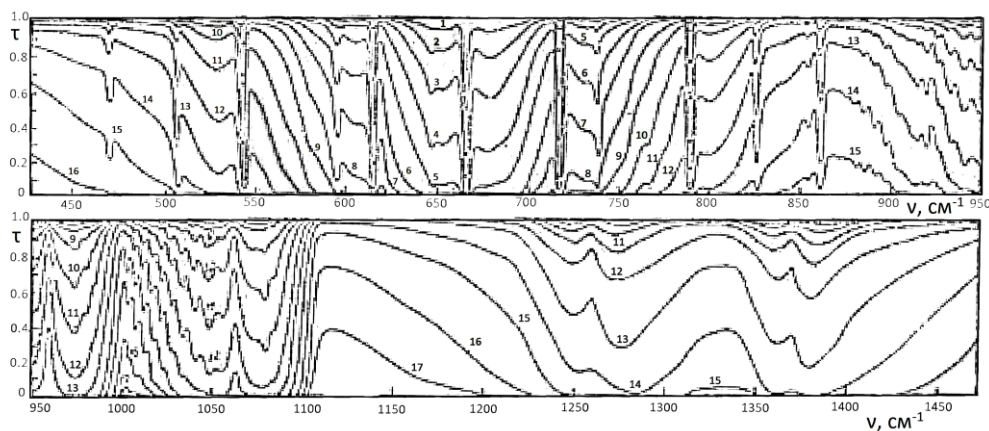


Рис. 1. Вычисленные МЧМ (сплошные кривые) и измеренные (точки) спектры поглощения излучения CO_2 в спектральном диапазоне $450\text{--}1450 \text{ см}^{-1}$ для содержания W , атм·см: 1–0,03; 2–0,1; 3–0,3; 4–1; 5–3; 6–10; 7–30; 8–100; 10–1000; 11–5000; 12–10000; 13–30000; 14–100000; 15–300000; 16–1000000; 17–3000000; $P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ атм}$, $T = 300 \text{ K}$

В настоящее время обращается большое внимание на разработку высокотемпературных атласов параметров СЛП различных ингредиентов, в том числе и CO_2 , которые выполняются на уровне международной кооперации различных рабочих групп [9, 10]. Их сравнение с описанной разработкой предполагается выполнить в будущем.

На рис. 1, показаны результаты расчетов ФСП по разработанному атласу параметров СЛП и эмпирическому контуру для формы СЛП в различных полосах CO₂ [4, 8], который описывается соотношением

$$\begin{cases} b_i(\nu) = b_{iL}(\nu) b_i'(\nu) \\ b_i(\nu) = (\nu - \nu_i)^{x_i} \exp[-a_i(\nu - \nu_i) - d_i]^{c_i} \end{cases}, \quad (11)$$

где x_i , a_i , d_i , c_i – экспериментально определенные параметры; i – номер линии; b_{iL} – контур Лоренца:

$$b_{iL} = \frac{d_i}{(\nu - \nu_i)^2 + d_i^2}. \quad (12)$$

Параметры x_i , a_i , d_i , c_i для CO₂ определены по результатам комплексных исследований спектров поглощения и эмиссии CO₂, выполненных с высоким и средним разрешением в [1, 4, 6-8, 10] в широком диапазоне давлений $P \in \{0,001; 70\}$ атм и представлены в табл. 2.

Высокотемпературные атласы параметров спектральных линий КВ полос поглощения CO, NO, HCl, OH

В настоящем разделе анализируются атласы параметров СЛП CO, HCl, NO и OH, предназначенные для решения задач радиационного теплообмена в нагретых газовых средах при температурах до 3000 К. По сравнению с имеющимися и доступными данными по СЛП [11], применяемыми для решения задач переноса излучения в атмосфере при $T \leq 300$ К, данный атлас СЛП содержит более обширную информацию по вращательным КВ-переходам.

Таблица 2

Параметры a , c , d , x контура СЛП CO₂ при соударении молекул CO₂ – CO₂, CO₂ – N₂

Полоса, мкм	Соударение	a	c	d	x
1,4	CO ₂ – N ₂	0,61	0,52	2	-0,02
1,4	CO ₂ – CO ₂	0,08	0,58	46	-0,06
1,6	CO ₂ – N ₂	0,64	0,42	3	0,02
1,6	CO ₂ – CO ₂	0,09	0,64	39	-0,05
2,0	CO ₂ – N ₂	0,56	0,42	1	0,03
2,0	CO ₂ – CO ₂	0,06	0,75	32	0,03
2,7	CO ₂ – N ₂	0,61	0,36	2	0
2,7	CO ₂ – CO ₂	0,065	0,80	6	-0,01
4,3	CO ₂ – N ₂	0,49	0,46	1	0
4,3	CO ₂ – CO ₂	0,098	0,72	10	0
15	CO ₂ – N ₂	0,044	0,61	3	0
15	CO ₂ – CO ₂	0,09	0,85	4	0

При подготовке атласов СЛП были учтены вносящие практический вклад в перенос излучения изотопические разновидности молекул. Атлас СЛП содержит значения центров линий ν_i , их интенсивности S_i и полуширины α_i при $T=900$ К, значения энергии нижнего состояния E'' , идентификации колебательных и вращательных квантовых чисел V и j , номер изотопической модификации молекулы. В табл. 3 систематизирована информация по разработке атласов СЛП CO, NO, OH, HCl [13].

Интенсивности и полуширины линий можно пересчитать на другие температуры T по известным спектроскопическим соотношениям:

$$S_i(T) = S_i(900) \frac{Q(900)}{Q(T)} \exp \left[-E_i k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{900} \right) \right] \frac{1 - \exp \left(-\frac{\nu_{ik}}{T} \right)}{1 - \exp \left(-\frac{\nu_{ik}}{900} \right)}, \quad (13)$$

Таблица 3

Информация по разработке атласов

Электронное состояние молекулы	Изотопические молекулы	Количество линий N , квантовые числа: V, j	Центры полос λ Интегральные интенсивности S_n , см ⁻² атм ⁻¹ <i>STP</i>		
			$\Delta V=1$	$\Delta V=2$	$\Delta V=3$
$\Sigma^1 \text{CO}$	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ $^{13}\text{C}^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}^{17}\text{O}$	$N=10604$ $V=0 \div 10$ $j=0 \div 120$	$\lambda=4,67$ мкм $S_n=260$	$\lambda=2,35$ мкм $S_n=1,95$	$\lambda=1,53$ мкм $S_n=0,013$
$\Sigma^1 \text{HCl}$	$\text{H}^{35}\text{Cl}, \text{H}^{37}\text{Cl}$ $\text{D}^{35}\text{Cl}, \text{D}^{37}\text{Cl}$	$N=4400$ $V=0 \div 10$ $j=0 \div 50$	$\lambda=3,46$ мкм $S_n=150$	$\lambda=1,76$ мкм $S_n=3,73$	$\lambda=1,19$ мкм $S_n=1,065 \cdot 10^{-2}$
$\Pi^2 \text{NO}$	$^{14}\text{N}^{16}\text{O}, ^{14}\text{N}^{18}\text{O}$ $^{15}\text{N}^{16}\text{O}, ^{14}\text{N}^{18}\text{O}$	$N=114240$ $V=0 \div 10$ $j=0,5 \div 119,5$	$\lambda=5,3$ мкм $S_n=122$	—	—
$\Pi^2 \text{OH}$	^{16}OH	$N=3125$ $V=0 \div 7$ $j=0,5 \div 26,5$	$\lambda=2,8$ мкм $S_n=44$	—	—

$$\alpha_i(T) = d_i(900) \left(\frac{T_0}{T} \right)^n, \quad (14)$$

где $k=1,439$; i – номер линии; Q – статическая сумма; n – эмпирический параметр. Для соударений молекул $\text{CO} - \text{N}_2$, $\text{CO} - \text{CO}_2$, $\text{CO} - \text{CO}$ он, соответственно, равен 0,62; 0,98; 0,86.

При пересчете интенсивности СЛП на другие температуры необходимо проводить нормировку интенсивности СЛП на интегральную интенсивность полосы $S_0(T)$ с учетом того, что интегральная интенсивность основных полос не зависит от температуры, а интегральная интенсивность S_0^n обертонов меняется по закону

$$S_0^n(T) = S_0^n(273\text{K}) \left[1 - \exp \left(-\frac{k\nu_0^1}{T} \right) \right]^{-n} \left[1 - \exp \left(-\frac{k\nu_0^n}{T} \right) \right], \quad (15)$$

где $k=1,439$; ν_0 и ν_0^n – центры основной полосы и обертона.

Уровни энергии молекул с основным электронным состоянием $^1\Sigma$, к которым принадлежат CO и HCl , хорошо описываются формулой Данхэма:

$$E_{v,j} = \sum_{m,n} Y_{m,n} \left(V + \frac{1}{2} \right)^m j^n (j+1)^n. \quad (16)$$

Информация о постоянных Данхэма $Y_{m,n}$, охватывает все изотопические модификации CO и HCl и позволяет определить значения энергетических уровней высоковозбужденных состояний. Сравнение рассчитанных таким образом значений центров линий с экспериментальными показывает, что для переходов с вращательным квантовым числом $j=40$ максимальное расхождение составляет порядка нескольких тысяч см⁻¹. С ростом j , разумеется, это расхождение будет расти.

Интенсивности линий СО и НСІ были получены с использованием постоянных разложения потенциальной функции и дипольного момента и нормировкой интенсивности СЛП на значения интегральных интенсивностей полос, приведенных в табл.1. Результаты экспериментального исследования интенсивности СЛП линий СО и НСІ в полосах 0–1 и 0–2 согласуются с расчетами. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений интенсивности СЛП составляет 8% [18, 21].

Основным электронным состоянием NO и OH является $^2\Pi$. Атласы СЛП NO и OH содержат параметры переходов как внутри электронных подсостояний $\Pi_{1/2} - \Pi_{1/2}$ и $\Pi_{3/2} - \Pi_{3/2}$, так и между электронными подсостояниями $\Pi_{1/2} \rightleftharpoons \Pi_{3/2}$ (учитывается λ -удвоение вращательных линий).

Уровни энергии NO определялись по формуле Олми и Хорсфола и спектроскопическим константам для четырех изотопических модификаций NO:

$$E_i(\Omega, jV) = Y(V) + B_v \left[\left(j + \frac{1}{2} \right)^2 - \Lambda^2 \right] + \\ + B_v \left[L(L+1) - \Lambda^2 \right] + (-1)^i \left[B_v \left(j + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{4A_v(A_v - 4B_v)} \right]^{\frac{1}{2}} - \\ - D_v \left[\left(j + \frac{1}{2} \right)^4 - \left(j + \frac{1}{2} \right) + 1 \right] \pm 1/2 E_i^\Lambda(j, V), \quad (17)$$

где $i=1$ и 2 для состояний $\Pi_{1/2}$ и $\Pi_{3/2}$ соответственно; $Y(V)$ – колебательная энергия; B_v , D_v – вращательные постоянные v -го колебательного уровня; A_v – константа спин-орбитального взаимодействия; E_i^Λ – энергия λ -удвоения; L , Λ – орбитальный момент и его проекция на молекулярную ось; Ω – проекция полного углового момента. Такой расчет дает точность в определении центров линий в полосе 0–1 не менее $0,02 \text{ см}^{-1}$, в горячих полосах порядка $0,1 \text{ см}^{-1}$.

Значения интенсивности линий NO были определены по формуле

$$S(\Omega'' j'' v'' \rightarrow \Omega' j' v') = S(T) \frac{\nu}{9Q(T)} \exp\left(-\frac{kE}{T}\right) \times \\ \times \left(1 - \exp\left(-\frac{k\nu_i}{T}\right)\right) \times (v''+1) S(\Omega'' j'' v'' \rightarrow \Omega' j' v'+1) F(j), \quad (18)$$

где S_0 – интегральная интенсивность линий перехода $\Delta v=1$; $\bar{\nu}$ – центр полосы $\Delta v=1$; $Q(T)$ стат-сумма; ν_i – центры линий; $S(\Omega'' j'' v'' \rightarrow \Omega' j' v'+1)$ – вероятность перехода по Джеймсу; $F(j)$ – фактор КВ взаимодействия. Сравнение расчета интенсивности СЛП с экспериментом дает удовлетворительное согласие. Максимальное отклонение интенсивности СЛП от экспериментальных значений составляет 9%. Достоинством рассмотренного подхода к расчету интенсивности линий NO является его простота по сравнению с другими методиками, предложенными в литературе. При расчете по формуле (16) использовалось значение интегральной интенсивности полосы 0–1 равное $122 \text{ см}^{-2} \text{ атм}^{-1} \text{ STP}$.

Центры СЛП OH определены по экспериментальным значениям термов пламени, выполненных на фурье-спектрометре. Интегральная интенсивность $S_{\text{и}}$ основной полосы OH 0–1 получена из измерений интенсивностей СЛП $P(4,5)_1$ с центром $3407,607$; $P(4,5)_1+$ с центром $3407,989 \text{ см}^{-1}$; $P(3,5)_2$ с центром $3421,936 \text{ см}^{-1}$; $P(3,5)_2+$ с центром $3422,012 \text{ см}^{-1}$. Как показали результаты исследований [1, 2, 13] УФ спектров излучения водород-кислородного и водород-воздушного пламен излучение OH является неравновесным и его температура превосходит газокинетическую температуру пламени, что необходимо

учитывать при определении S_n из измерений интенсивностей СЛП ОН. Этим объясняется значительный разброс в данных измерений S_n различных авторов в диапазоне значений от 24 до 110 см⁻² атм⁻¹ STP.

В результате наших измерений колебательная температура перехода 0–1 определена из измерений УФ спектров для секвенции $\Delta v = \pm 1$. Интегральная интенсивность $S_n = 44$ см⁻² атм⁻¹ STP полосы определена из соотношения (15), в котором термодинамическая температура T заменяется колебательной температурой T_k перехода $\Delta v = \pm 1$ ОН. Концентрация ОН в пламенах определяется термодинамическим расчётом [13] с погрешностью не более 0,8% [16].

Применение численного моделирования ФСП по высокотемпературным атласам параметров СЛП для получения радиационных характеристик продуктов сгорания топлив и решения задач радиационного теплообмена

Эра широкого применения метода численного моделирования радиационного теплообмена начата в 70-х годах прошлого столетия в планетарных атмосферах [3-5] и сложного радиационного теплообмена в высокотемпературных средах [1–2]. При этом использовались высокотемпературные атласы параметров СЛП, описанные выше, и базы данных по параметрам СЛП [5].

В настоящее время возможно использование высокотемпературного атласа параметров СЛП водяного пара [11, 12, 17, 19-21] с нормировкой интенсивностей СЛП на измеренные спектральные коэффициенты поглощения [14]. Для получения ФСП может использоваться теория модельного представления спектров, в которой статистические характеристики по структуре спектра и распределению интенсивностей СЛП внутри выбранного спектрального интервала описываются исходя из атласов СЛП и учитывают их температурную зависимость. Другим приёмом может стать применение двухпараметрического метода эквивалентной массы для расчётов ФСП $\tau_{\Delta v}$ в структурно-неоднородных средах [3-5], для которого $\tau_{\Delta v}$ описывается соотношением

$$\left(\frac{1}{\ln \tau_{\Delta v}} \right) = \left(\frac{1}{\ln \tau'_{\Delta v}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\ln \tau''_{\Delta v}} \right)^2 + \frac{M}{(\ln \tau'_{\Delta v})(\ln \tau''_{\Delta v})}, \quad (19)$$

где $\tau'_{\Delta v}$ – ФСП в аппроксимации слабого поглощения; $\tau''_{\Delta v}$ – ФСП в аппроксимации сильного поглощения:

$$\tau'_{\Delta v} = \exp[-k_{\Delta v}(T)w], \quad \tau''_{\Delta v} = \exp[-\beta_{\Delta v}(T)P_3^{n/m} \cdot w^m], \quad (20)$$

где w – содержание компонента на оптическом пути; P_3 – эффективное давление; $k_{\Delta v}(T)$, $\beta_{\Delta v}(T)$, m , n , M – параметры, которые определяются из данных по ФСП, вычисленных прямым численным интегрированием монохроматических ФСП в пределах выбранного спектрального интервала Δv . При этом $K_{\Delta v}(T) = \sum_i S_i(T)/\Delta v$, где суммирование выполняется по всем СЛП, входящим в выбранный спектральный интервал Δv .

Параметр M определяет скорость перехода от аппроксимации слабого поглощения к аппроксимации сильного поглощения. При перекрывании спектральных линий выполняется закон Бугера для ФСП, когда $K_{\Delta v}(T) = \beta_{\Delta v}(T)$, $m = 1$, $n = 0$, $M = -1$. Для полос индуцированного давления поглощения и континуального поглощения излучения крыльями СЛП $m = n = 1$; $M = -1$; $K_{\Delta v}(T) = \beta_{\Delta v}(T)$. В общем случае $m \in \{0,1\}$, $n \in \{0,1\}$, $M \in \{0,-1\}$.

Для многокомпонентной структурно-неоднородной среды

$$\left| \ln \tau'_{i\Delta v} \right| = \int_L k_{i\Delta v}(T) \rho[L(T)] dL, \quad (21)$$

$$\left| \ln \tau_{i\Delta\nu}'' \right| = \left\{ \int_L \beta_{i\Delta\nu}^{1/m_i}(T) \rho_i [L(T)] P_{i\Delta\nu}^{n_i/m_i}(L) dL \right\}^{m_i}, \quad (22)$$

$$\left| \ln \tau_{\Delta\nu} \right| = \left| \ln \tau_{i\Delta\nu} [L(T)] \right|, \quad (23)$$

$$\tau_{\Delta\nu} = \exp \left[- \sum_i \ln \tau_{i\Delta\nu} [L(T)] \right], \quad (24)$$

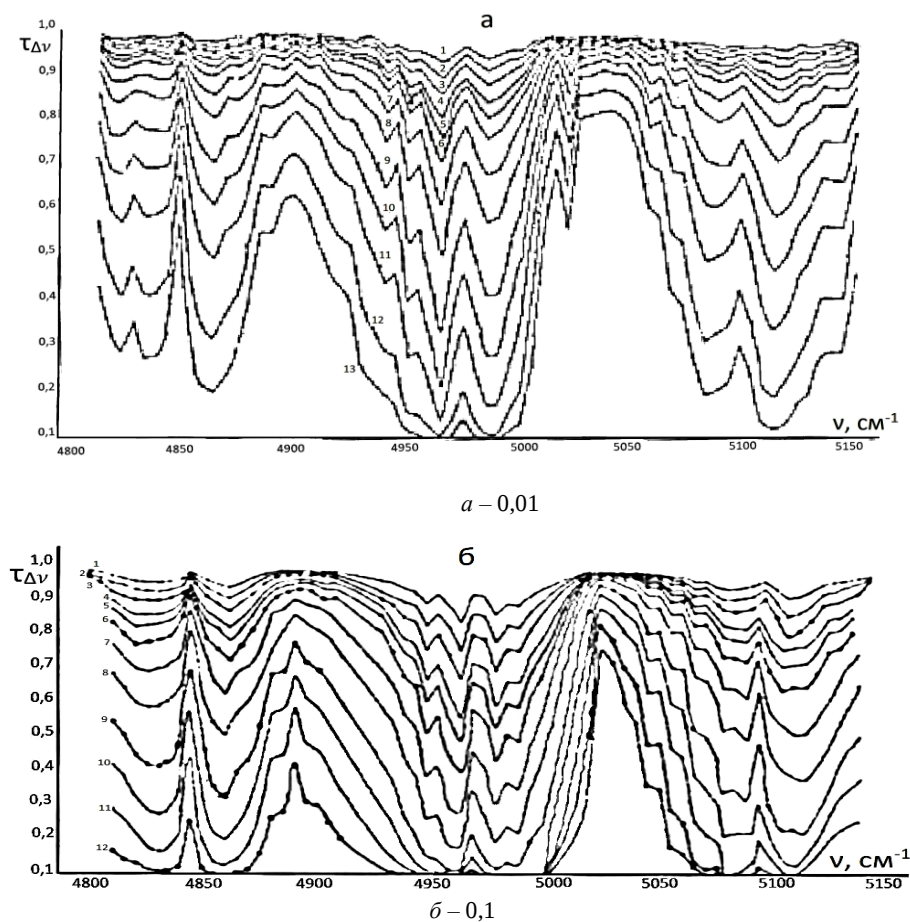
$$P_{i\Delta\nu} = P_{N_2} + \sum_k -\beta_{ik} [L(T)] P_k(L). \quad (25)$$

Параметризация ФСП выполняется для газовых оптически активных ингредиентов, уширенных азотом. Учет воздействия на ФСП уширения СЛП при столкновениях с молекулами других компонентов реализуется введением эффективного давления:

$$P_{i\Delta\nu} = P_{N_2} + \sum_k \beta_{ik} [L(T)] P_k(L), \quad (26)$$

где $\beta_{ik} = \alpha_{0i}(i-k)/\alpha_{0i}(i-N_2)$; $\alpha_{0i}(i-k)$; $\alpha_{0i}(i-N_2)$ – приведенные к давлению $P=1$ атм параметры линий для столкновения молекул $(i-k)$ и $(i-N_2)$.

На рис. 2, 3, 4 показаны примеры расчетных данных по ФСП и спектральным коэффициентам поглощения $k_{\Delta\nu}$ для CO_2 , CO , NO , полученные на базе разработанных атласов параметров СЛП.



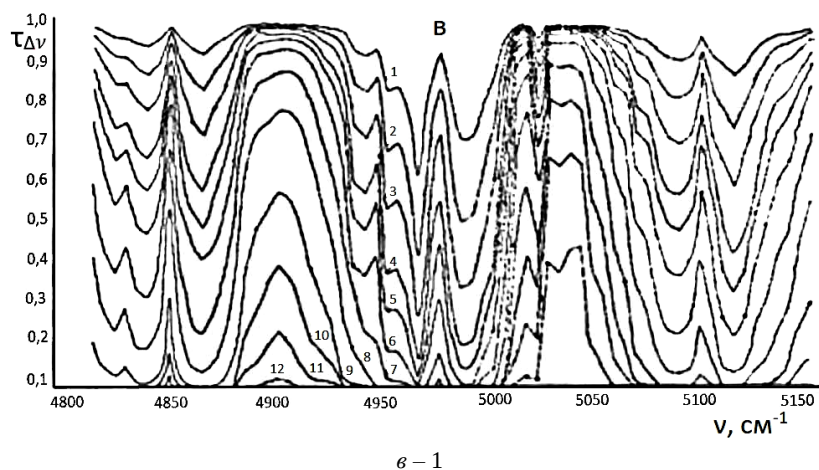
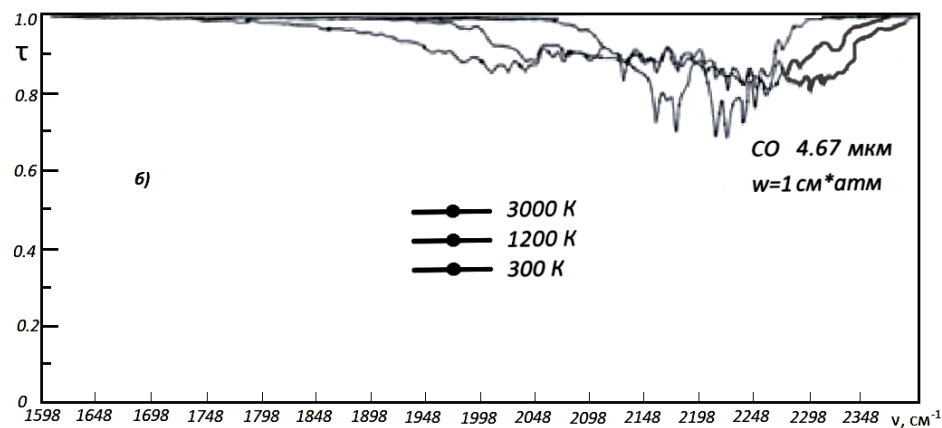
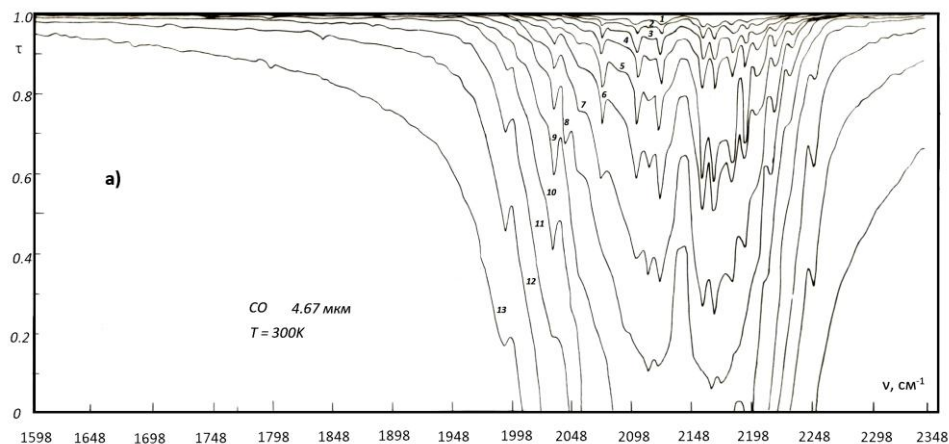


Рис. 2. Функции спектрального пропускания τ_ν CO_2 в полосках 2 мкм CO_2 для содержания W_{CO_2} , атм·см: 1–20; 2–50; 3–100; 4–200; 5–300; 6–500; 7–1200; 8–2000; 9–5000; 10– $1 \cdot 10^4$; 11– $2 \cdot 10^4$; 11– $5 \cdot 10^4$; 13– $1 \cdot 10^5$. Давление P_{CO_2} , атм: а – 0,01; б – 0,1; в – 1



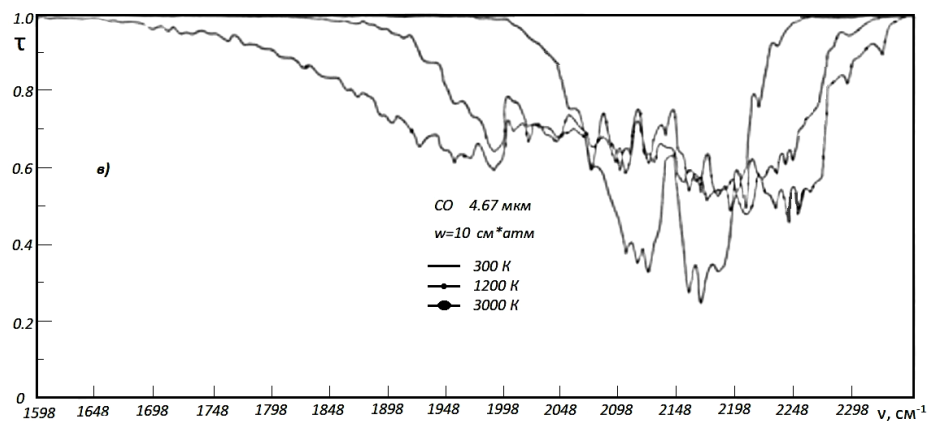


Рис. 3. Функции спектрального пропускания τ , CO в основной полосе 4,67 мкм, вычисленные МЧМ:
 а) для содержания W_{CO} , атм·см: 1–0,01; 2–0,03; 3–0,1; 4–0,3; 5–1; 6–3; 7–10; 8–30; 9–100; 10–300;
 11–1000; 12–3000; 13–10000; б) для температур 300, 1200, 3000 К при $W_{CO}=1$ атм·см STP;
 в) для температур 300, 1200, 3000 К при $W_{CO}=10$ атм·см STP.
 Спектральное разрешение $\Delta\nu=10$ см⁻¹

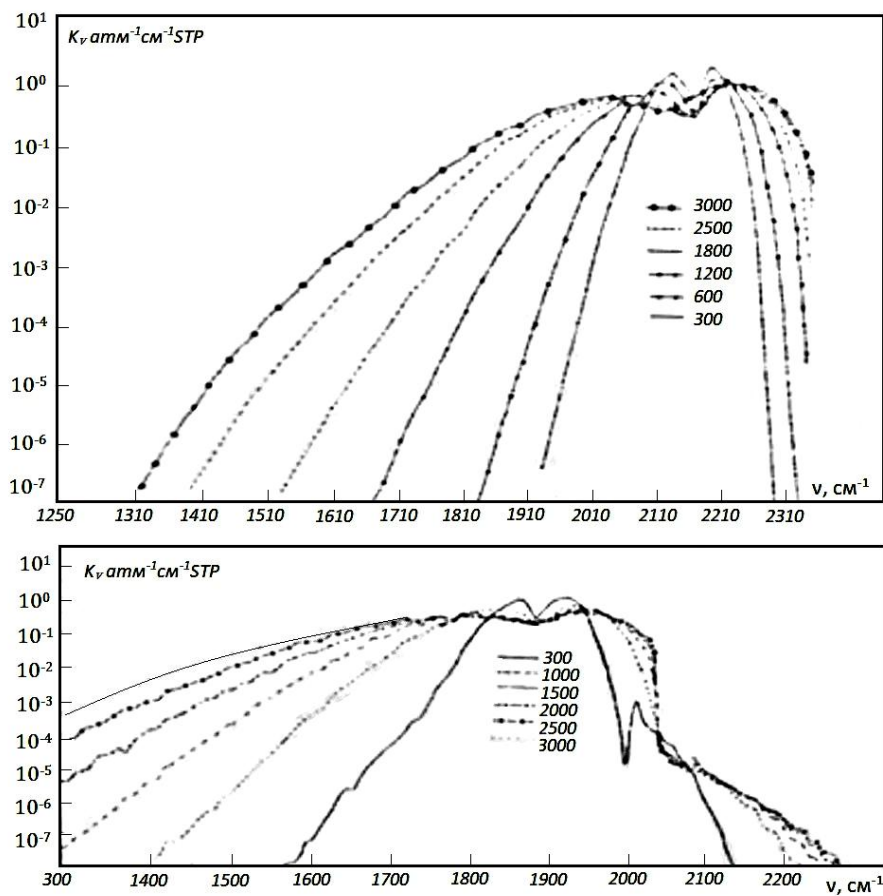


Рис.4. Коэффициент поглощения в основных полосах 4,67 мкм CO (а) и 4,54 мкм NO (б)
 в диапазоне температур 300–3000 К

Выводы

1. Разработаны высокотемпературные атласы параметров СЛП CO_2 , CO , NO , OH , HCl для расчета их радиационных характеристик по моделям полос поглощения и вычислений методом прямого численного интегрирования тонкой структуры спектров поглощения. Показана возможность параметризации ФСП по двухпараметрическому методу эквивалентных масс, используя данные прямого численного интегрирования по ФСП для различных содержаний ингредиентов, давлений и температур. Для реализации необходимой точности расчетов целесообразна перенормировка СЛП с учетом экспериментальных температурных зависимостей интегральных интенсивностей полос поглощения и спектральных коэффициентов поглощения.

2. Анализ экспериментальных данных по температурной зависимости интегральных интенсивностей КВ-полос поглощения водяного пара [14] свидетельствует о сильном влиянии эффекта ангармонизма потенциальной функции для молекулы H_2O на интегральные интенсивности S_n комбинационных и обертоновых полос. С ростом температуры от 300 до 3000 К S_n возрастают от нескольких до десятков раз. В связи с этим перенормировка интенсивностей спектральных линий поглощения атласов [11, 12, 15-21] с изменением температуры среды распространения излучения на измеренные спектральные коэффициенты поглощения $k_{\Delta\nu}(T)$ необходима. Для основных КВ-полос поглощения интегральная интенсивность S_n от температуры не зависит.

Литература

1. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Loktev N.F., Parzhin S.N., Zagidullin R.A. Transfer over of nonequilibrium radiation in flames and high – temperature mediums. – Optoelectronics – devices and applications. Intechweb. Croatia. 2010. P. 469-526.
2. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О., Локтев Н.Ф., Мисбахов Р.Ш. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокотемпературные среды, радиационный теплообмен. Монография. Казань: Каз. гос. энерг. Ун-т. 2014. 264 с.
3. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферы и климат. – М.: ВИНТИ. 1984. 264 с.
4. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Тепловое излучение планет. – Л.: Гидрометеиздат. 1977. 264 с.
5. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Ключевые проблемы исследований планет солнечной системы (Парниковый эффект атмосферы). – М.: ВИНТИ. 1983. 154 с.
6. Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dodov I.R. Measuring system for investigation spectra of gas media at high pressures // Journ. Appl. Spectr. 2016. V.83. №3. P. 449-453.
7. Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dodov I.R. Spectral cryogenic high – aperture multipass gas cells for investigating absorption of radiation by gaseous media // Journ. Appl. Spectr. 2016. V.83. №5. P.868-871.
8. Moskalenko N.I., Zotov O.B., Il'in Yu.A., Parzhin S.N., Khamidullina M.S. Complex investigation of the absorption and emission spectra of carbon dioxide // Russ. Phys. Journ. 2017. V.59. Iss.12. P.2017-2021.
9. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Il'in Yu.A. Investigation of nonequilibrium hydroxyl emission spectra // Russian Phys. Journal/ New York: Springer link. 2010. V.53. №2. P. 107-113.
10. Москаленко Н.И., Паржин С.Н., Хамидуллина М.С. Спектрометрия газовых сред с применением двухлучевой установки на базе спектрофотометра ИКС-24 // Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2016. №5-6. С. 99-109.
11. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al. The HITRAN – 2012 molecular spectroscopic database // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2013. V.130. P.4-50.
12. Alberti M., Veber R., Manicini M., Ctausen S., Validation of HITRAN – 2010 for carbon dioxide and water vapour at high temperatures and atmospheric pressures in 450-7600 cm^{-1} spectral range // Journ. Quant Spectr. Radiat. Transfer. 2015. T.157. P.14-33.

13. Каюмова Г.В., Москаленко Н.И., Паржин С.Н. Атлас параметров спектральных линий и поглощение излучения атмосферными CO, NO, OH, HCl. – В кн.: «Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распределению лазерного излучения в атмосфере». Томск. 1979. Ч.3. С.182-186.
14. Il'in Yu.A., Sadykova M.S. Investigation of the emission and absorption spectra of water vapour // Russian Physics Journal. 2015. V.57. №9. P.1153-1159.
15. Gorden I.E., Rothman L.S., et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2017. V.203. P.3-69.
16. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Крюков В.Г., Тишин А.П. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергетических установках. –М.: Наука. 1989. 254 с.
17. Alberti M., Veber R., Manicini M., Fateev A., Clausen S. Validation of HITEMP – 2010 for carbon dioxide and water vapor and high temperature and atmospheric pressures in spectral range // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2015. V.157. P. 14–33.
18. Zak E., Tennyson J., Polyansky O.L. et al. A room temperature CO₂ line list with ab initio computed intensities // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 31–42.
19. Hill C., Gorden L.E., Kochanov R.V. et al. HITRAN online. An online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 15–42.
20. Devi V.M., Benner D.C., Sun K. et al. Line parameter including temperature dependences of self- and air-broadened line shape of 12C16O₂: 1.6-μm region. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 117–144.
21. Gorden I.E., Rothman L.S., Hill C. et al. The HITRAN molecular spectroscopic database. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2017. V.203. P. 3–69.

Авторы публикации

Москаленко Николай Иванович – д. ф.-м. н., профессор, кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета. Email: NikMoskalenko@list.ru.

Додов Ибрагим Русланович – Аспирант, кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета. Email: utisey@gmail.com.

Каюмова Гузель Валеевна – Казанский государственный энергетический университет. Email: Kayumova@mail.ru.

Хаертдинова Алина Рустямовна – магистр, кафедры «Тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета. Email: Kh.alina2014@yandex.ru.

Хамидуллина Марьяна Салаватовна – Аспирант Казанского государственного энергетического университета. Email: maryana1125@mail.ru.

Шешуков Евгений Геннадьевич – докт. ф.-м. наук, старший научный сотрудник кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Loktev N.F., Parzhin N.S., Zagidullin R.A. Transfer over of nonequilibrium radiation in flames and high – temperature mediums. – Optoelectronics – devices and applications. Intechweb. Croatia. 2010. P. 469-526.

2. Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Loktev N.F., Mithbachov R.Sh. Equilibrium and non-equilibrium radiation processes: high-temperature media, radiation heat transfer. Monograph. Kazan: KSPEU. 2014. 264 p.
3. Kondrat'ev K.Ya., Moskalenko N.I. Greenhouse effect of the atmosphere and climate. – M.: All-UISTI. 1984. 264 p.
4. Kondrat'ev K.Ya., Moskalenko N.I. Thermal radiation of planets. – L.: Gidrometeoizdat. 1977. 264 p.
5. Kondrat'ev K.Ya., Moskalenko N.I. Key research problems of the planets of the solar system (Greenhouse effect of the atmosphere). – M.: All-UISTI. 1983. 154 p.
6. Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dodov I.R. Measuring system for investigation spectra of gas media at high pressures // Journ. Appl. Spectr. 2016. V.83. №3. P. 449-453.
7. Moskalenko N.I., Mirumyants S.O., Parzhin S.N., Dodov I.R. Spectral cryogenic high – aperture multipass gas cells for investigating absorption of radiation by gaseous media // Journ. Appl. Spectr. 2016. V.83. №5. P.868-871.
8. Moskalenko N.I., Zotov O.B., Il'in Yu.A., Parzhin S.N., Khamidullina M.S. Complex investigation of the absorption and emission spectra of carbon dioxide // Russ. Phys. Journ. 2017. V.59. Iss.12. P.2017-2021.
9. Moskalenko N.I., Zaripov A.V., Il'in Yu.A. Investigation of nonequilibrium hydroxyl emission spectra // Russian Phys. Journal/ New York: Springer link. 2010. V.53. №2. P. 107-113.
10. Moskalenko N.I., Parzhin S.N., Khamidullina M.S. Spectrometry of gas media with the use of a two-beam setup based on the spectrophotometer IKS-24 // Proceedings of universities. Energy problems. 2016. №5-6. P. 99-109.
11. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al. The HITRAN – 2012 molecular spectroscopic database // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2013. V.130. P.4-50.
12. Alberti M., Veber R., Manicini M., Clausen S., Validation of HITEMP – 2010 for carbon dioxide and water vapour at high temperatures and atmospheric pressures in 450-7600 cm⁻¹ spectral range // Journ. Quant Spectr. Radiat. Transfer. 2015. T.157. P.14-33.
13. Kayumova G.V., Moskalenko N.I., Parzhin S.N. The atlas of the parameters of the spectral lines and the absorption of radiation by atmospheric CO, NO, OH, HCl. – In: "Abstracts of the V All-Union Symposium on the Distribution of Laser Radiation in the Atmosphere." Tomsk. 1979. S.3. P.182-186.
14. Moskalenko N.I., Il'in Yu.A., Sadykova M.S. Investigation of the emission and absorption spectra of water vapour // Russian Physics Journal. 2015. V.57. №9. P.1153-1159.
15. Gordon I.E., Rothman L.S., et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2017. V.203. P.3-69.
16. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Kryukov V.G., Tishin A.P. Mathematical modeling of high-temperature processes in power plants. – M.: Science. 1989. 254 p.
17. Alberti M., Veber R., Manicini M., Fateev A., Clausen S. Validation of HITEMP – 2010 for carbon dioxide and water vapor and high temperature and atmospheric pressures in spectral range // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2015. V.157. P. 14–33.
18. Zak E., Tennyson J., Polyansky O.L. et al. A room temperature CO₂ line list with ab initio computed intensities // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 31–42.
19. Hill C., Gordon L.E., Kochanov R.V. et al. HITRAN online. An online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database // Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 15–42.
20. Devi V.M., Benner D.C., Sun K. et al. Line parameter including temperature dependences of self- and air-broadened line shape of 12C16O₂: 1.6-μm region. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2016. V.177. P. 117–144.
21. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al. The HITRAN molecular spectroscopic database. Journ. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. 2017. V.203. P. 3–69.

Authors of the publication

Nikolai I. Moskalenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: NikMoskalenko@list.ru.

Ibrahim R. Dodov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: utisey@gmail.com.

Guzel V. Kayumova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: Kayumova@mail.ru.

Alina R. Khaertdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: Kh.alina2014@yandex.ru.

Maryana S. Khamidullina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: maryana1125@mail.ru.

Evgenij G. SHeshukov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

09 октября 2018 г.



ВОЗМОЖНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТОВ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЦЕХОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ

Е.И. Грачева, А.Н. Алимова

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: Представленная статья посвящена анализу и исследованию причин возникновения и величин возможных погрешностей от неучета основных определяющих характеристик при расчете потерь электроэнергии в цеховых сетях низкого напряжения. Доказано, что при определении потерь электроэнергии в линиях цеховых сетей необходимо учитывать влияние следующих параметров оборудования: нагрева проводников, обусловленного прохождением тока нагрузки через проводники и температурой окружающей среды; сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов и их числа; вида графика нагрузки; температуры окружающей среды. Исследуется схема цеховой сети и суточные графики нагрузки потребителей одного из предприятий нефтепромышленного комплекса. Вычислены погрешности расчетов потерь электроэнергии и проведен анализ влияния параметров оборудования на величину потерь электроэнергии. Показано, что отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, определяющих эти параметры, приводит к погрешности от 5 до 80 % при вычислении потерь электроэнергии в системах промышленного электроснабжения.

Ключевые слова: электрооборудование цехов, компоновка, графики нагрузки, потери электроэнергии, температура провода, температура окружающей среды, сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов и их числа, суточные графики нагрузки.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92.

Для цитирования: Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92.

POSSIBLE ERRORS OF CALCULATIONS OF LOSSES OF THE ELECTRIC POWER ON SHOP INDUSTRIAL NETWORKS

E.I. Gracheva, A.N. Alimova

Kazan state power-engineering university, Kazan, Russia

Abstract: In the article it is devoted the analysis and researches of origins and values of possible errors from not accounting of the main defining characteristics when calculating losses of the electric power on shop networks of a low tension. It is proved that in case of determination of losses of the electric power in lines of shop networks it is necessary to consider influence of the

following parameters of the equipment: the heating of conductors caused by passing of current of loading through conductors and ambient temperature; resistance of contact joints of switching devices and their number; type of the load graph; ambient temperatures. The diagram of a shop network and daily load graphs of customers of one of the enterprises is researched. Errors of calculations of losses of the electric power are calculated and the analysis of influence of parameters of the equipment on value of losses of the electric power is carried out. The absence of reliable information about elements of shop networks of a low tension and not accounting of the determining leads to an error 5 - 80% in case of computation of losses of the electric power in the systems of industrial electrical power supply.

Keywords: electric equipment of shops, configuration, load graphs, losses of the electric power, wire temperature, ambient temperature, resistance of contact joints of switching devices and their numbers, daily load graphs.

For citation: E.I. Gracheva, A.N. Alimova. Possible errors of calculations of losses of the electric power on shop industrial networks. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92.

Введение

Характерная для настоящего времени модернизация оборудования систем промышленного электроснабжения предполагает усложнение структуры, схем и функций внутрицеховых электрических сетей.

Как известно, электрические сети напряжением 0,4 кВ являются последним звеном в цепи передачи и распределения электроэнергии (ЭЭ) от электростанции к потребителям. Как правило, в целом они составляют около 40% от суммарной протяженности всех электрических сетей [1–3]. От надежности работы сетей 0,4 кВ и их загрузки решающим образом зависят надежность, качество и экономичность электроснабжения потребителей [4–7], а от точности расчетов технических потерь в сетях 0,4 кВ – точность выявления коммерческих потерь в электрических сетях в целом [8–11]. Расчет потерь ЭЭ в этих сетях является одним из наиболее трудоемких. Это связано со следующим особенностями распределительных сетей 0,4 кВ:

- большим объемом информации с одновременно низкой ее достоверностью;
- большой протяженностью и разветвленностью схем;
- динамикой изменения схемных и особенно режимных параметров;
- различным исполнением участков: пятипроводные (три фазы, ноль и фонарный провод), четырехпроводные (три фазы и ноль), трехпроводные (две фазы и ноль), двухпроводные (одна фаза и ноль);
- неравномерностью загрузки фаз;
- неодинаковостью фазных напряжений на шинах питающей трансформаторной подстанции [12; 13].

Степень применения того или другого метода расчета потерь ЭЭ определяется, прежде всего, возможностью получения достоверной информации для его реализации и погрешностью метода [13].

Развитие методов расчета потерь ЭЭ условно можно разделить на два этапа. На первом этапе, который начался в конце 40-х годов прошлого века, в течение двадцати лет в основном совершенствовался метод расчета потерь ЭЭ по числу часов максимальных потерь t . Наиболее полный анализ применения различных модификаций расчетной формулы t наглядно показал, что этот метод нежелательно использовать для расчета потерь

ЭЭ в замкнутых электрических сетях, и дальнейшие исследования в этом направлении не являются актуальными.

Для более точного расчета потерь ЭЭ в начале 60-х годов прошлого века начали развивать детерминированные и вероятностно-статистические методы расчета.

Постановка задачи исследования

Точные данные о факторах, определяющих значения потерь ЭЭ в низковольтных сетях, получить трудно, а зачастую невозможно. Так, например, данные, приводимые в справочной литературе, о величине сопротивлений, контактных соединений коммутационных аппаратов весьма ограничены и приближены. А графики нагрузок приемников низковольтных сетей на предприятиях, как правило, отсутствуют.

Неполнота информации заставляет использовать методы расчета, основанные на тех или иных допущениях, определяющих предполагаемое влияние на результаты расчета отсутствующей информации. Погрешности, вызванные неполнотой информации, обычно называют «методическими», так как каждый метод ориентирован на свой объем информации [14–17].

Дополнительные погрешности вносятся в расчет из-за ограниченной точности информации, используемой тем или иным методом. Применительно к этим составляющим погрешности используется термин «информационные погрешности».

Качественное различие между указанными составляющими состоит в том, что первая органически присуща методу, она не зависит от точности используемой информации, и для конкретного расчета ее численное значение определяется только значимостью допущений, принятых при разработке метода. Для конкретного расчета эта погрешность не может быть уменьшена никакими способами, кроме перехода на другой метод. Например, если метод не учитывает возможность различия конфигураций графиков нагрузки узлов, то погрешность расчета будет тем меньше, чем меньше эти различия в конкретном случае. Однако при заданных конфигурациях графиков она будет иметь определенное значение, которое в рамках данного метода уменьшить нельзя. Вторая составляющая изменяется в зависимости от точности используемой информации и теоретически может быть сведена к нулю при использовании идеально точной информации.

Наличие указанных погрешностей приводит к тому, что фактически потери энергии будут в большей или меньшей степени отличаться от их расчетного значения.

Естественно, что чем менее полная информация имеется в наличии, тем более простой метод расчета приходится применять и тем большая методическая погрешность вносится в расчет. Чем менее точна имеющаяся информация, тем большая информационная погрешность вносится дополнительно.

Оценка возможных погрешностей расчета потерь

Потери ЭЭ в сети с m -ветвями кабельных линий (КЛ) при неизменных в период T составе и топологии схемы электроснабжения промышленного предприятия можно представить так:

$$\Delta W = 3 \cdot \sum_{i=1}^m I_j^2(t) \cdot R_j(t) dt, \quad (1)$$

где $I_j^2(t)$ – среднеквадратичный ток линии в момент времени t , определяется по экспериментальному или расчетному графику нагрузки линии, либо по одной из многочисленных методик расчета электрических нагрузок [14]; $R_j(t)$ – эквивалентное сопротивление линии, значение которого в каждый момент времени t зависит от фактической температуры провода $\Theta_{пр}$, а также от количества установленных на линии коммутационных аппаратов:

$$R = r_{20} \cdot L [1 + \alpha(\Theta_{\text{пр}} - 20^\circ)] + \sum_{i=1}^k r_i, \quad (2)$$

где r_{20} – удельное сопротивление 1 м линии при 20°C , мОм/м; L – длина линии, м, должна определяться по плану прокладки линии с учетом того, что провода и кабели прокладываются «змейкой», а не внастяжку, чтобы скомпенсировать монтажные и температурные удлинения линии; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала провода линии, равный для меди и алюминия $0,00385 \text{ } 1/^\circ\text{C}$; $\Theta_{\text{пр}}$ – температура жилы провода, зависящая от нагрузки линии и от температуры окружающей

среды, $^\circ\text{C}$; $\sum_{i=1}^k r_i$ – сумма сопротивлений контактных соединений, в том числе и коммутационных аппаратов, включенных в линию, мОм.

Температура жилы проводника определяется по выражению

$$\Theta_{\text{пр}} = k_3^2 \cdot (T_{\text{доп}} - \Theta_{\text{окр}}) + \Theta_{\text{окр}}, \quad (3)$$

где k_3^2 – среднеквадратичный коэффициент загрузки линии; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы кабеля, определяется по справочным данным; $\Theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Рассмотрим на примере возможную погрешность определения потерь ЭЭ в линии цеховой сети от неучета следующих факторов:

- 1) неучет графиков нагрузки;
- 2) неучет нагрева проводника током нагрузки;
- 3) неучет температуры окружающей среды;
- 4) неучет сопротивлений коммутационных аппаратов, установленных на линии.

Исследуемая схема цеховой сети $0,4 \text{ кВ}$ одного из предприятий нефтепромышленного комплекса показана на рис.1. Параметры линий приведены в табл. 1.

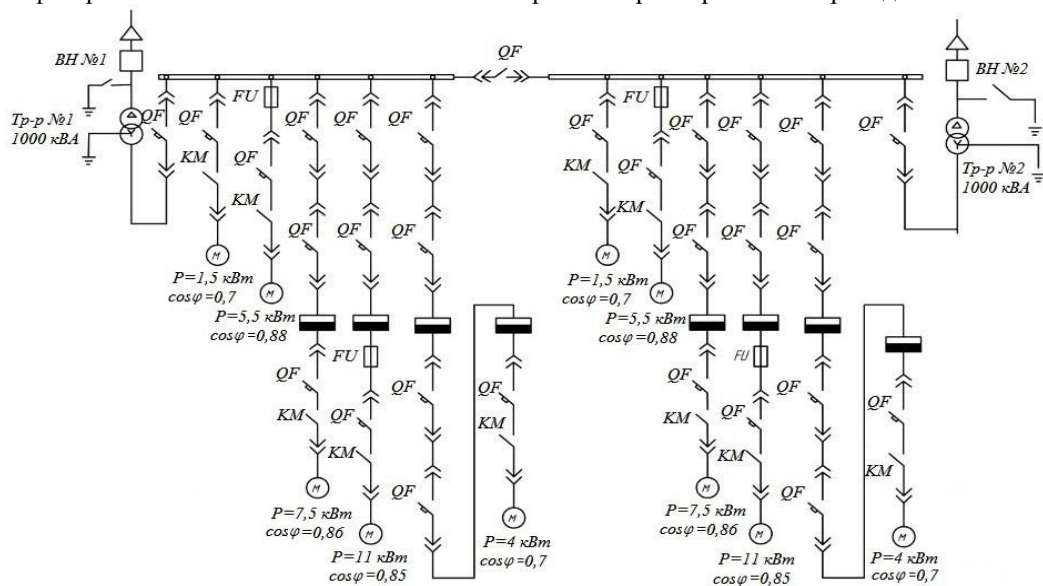


Рис.1. Исследуемая схема цеховой сети $0,4 \text{ кВ}$. Линии: 1, 12 – питающие линии; 2, 7 – линии с 2 коммутационными аппаратами; 3, 8 – линии с 3-мя аппаратами; 4, 9 – линии с 4-мя аппаратами; 5, 10 – линии с 5-ю аппаратами; 6, 11 – линии с 6-ю аппаратами

Таблица 1

Параметры линий цеховой сети

№ линии	Марка и сечение кабельной линии	Длина линии, м	Количество ком. аппаратов на линии	Тип авт. выключателя	Тип магнитного пускателя	Тип предохранителя
2,7	ВВГнг4х2,5	5	2	AE2046-10A	ПМЕ-111	
3,8	ВВГнг4х2,5	10	3	AE2046-20A	ПМЕ-211	ПР-2-10
4,9	ВВГнг4х4	25	4	3хAE2046-25A	ПМЕ-211	
5,10	ВВГнг4х4	40	5	2хМЕ-86-63A	ПАЕ-411	ПР-2-60
6,11	ВВГнг4х4	60	6	5хAE2046-25A	ПМЕ-211	

Определим потери ЭЭ в линии по среднеквадратичному значению тока нагрузки. Эквивалентное сопротивление линии найдём с учётом сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов и с учётом нагревания проводников линии. Сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов

№ линии	Тип авт. выключателя	R, мОм	Тип магнитного пускателя	R, мОм	Тип предохранителя	R, мОм
2,7	AE2046-10A	22,10	ПМЕ-111	110,20		
3,8	AE2046-20A	12,30	ПМЕ-211	44,10	ПР-2-10	16,5
4,9	AE2046-25A	12,30	ПМЕ-211	44,10		
5,10	МЕ-86-63A	4,30	ПАЕ-411	17,5	ПР-2-60	4,7
6,11	AE2046-25A	12,30	ПМЕ-211	44,10		

Допустимая температура жилы провода ВВГнг с поливинилхлоридной изоляцией равна 70°C. Удельное сопротивление линий сечением 2,5 мм² составляет 0,0074 Ом/м, а для сечения 4 мм² – 0,00463 Ом/м при $\Theta_0 = 20^\circ\text{C}$. На рис. 2 показаны суточные графики нагрузки линий цеховой сети, на рис. 3 – суммарный суточный график нагрузки цеховой сети.

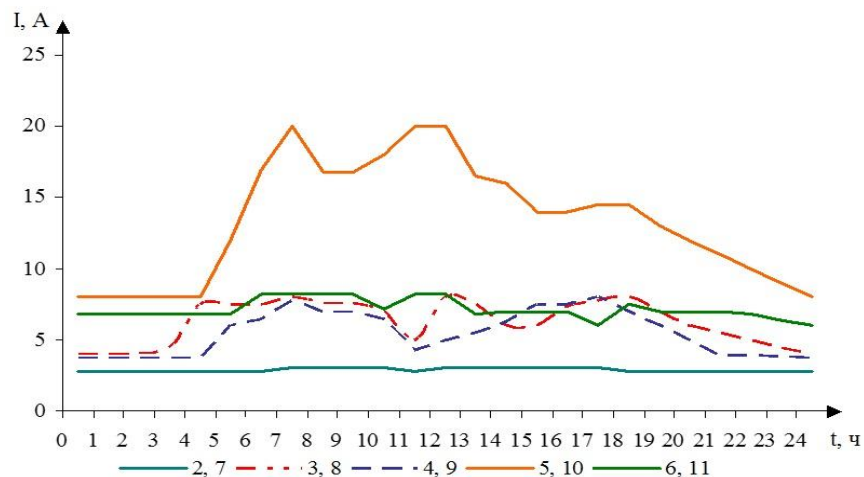


Рис.2. Суточные графики нагрузки линий 2-11 цеховой сети

Рассмотрим влияние температуры окружающей среды на величину потерь ЭЭ в системах промышленного электроснабжения. Расчёт проведём для линии 2 и температуры окружающей среды 5°C.

Для начала определим температуру провода с учётом нагрева током нагрузки и температуры окружающей среды при $k_3^2 = 0,0093$:

$$\Theta_{\text{пр}} = 0,0093 \cdot (70 - 5) + 5 = 5,6033 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определим эквивалентное сопротивление линии с учётом сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов:

$$R = 0,037 \cdot [1 + 0,004 \cdot (5,6033 - 20)] + 0,132 = 0,1672 \text{ Ом},$$

Определим потери за период времени $T=24$ ч, если среднеквадратичный ток $I_{\text{ср}}=2,8939$ А:

$$\Delta W = 3 \cdot 2,8939^2 \cdot 0,1672 \cdot 24 = 100,796 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

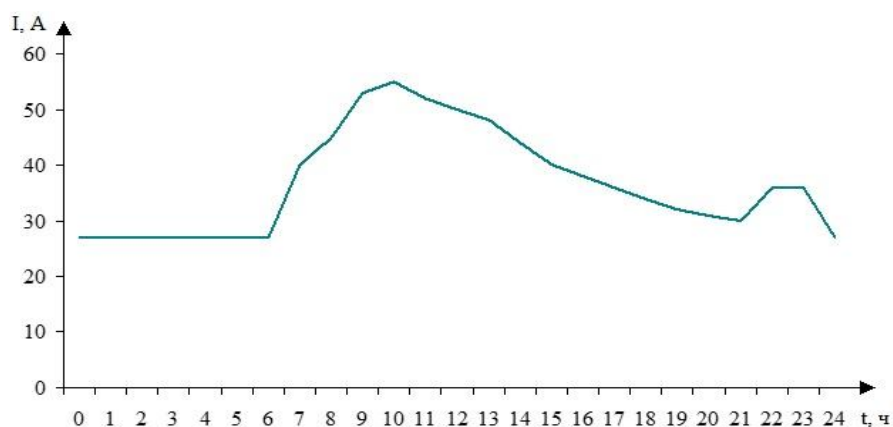


Рис. 3. Суммарный суточный график нагрузки

Результаты расчета потерь ЭЭ при температуре окружающей среды от 5 до 35°C представлены в табл. 3. Суточный график зависимости величины потерь активной мощности при различных значениях температуры окружающей среды показан на рис. 4.

Таблица 3

Результаты расчет потерь ЭЭ при различных значениях температуры окружающей среды

Температура окр. среды, °C	Температура провода, °C	Rэ, Ом	Сопротивление ком. аппаратов, Ом	I _{ср.кв} , А	Потери ЭЭ, кВтч
5	5,603279614	0,16716929	0,1323	2,8939	100,796
10	10,55687349	0,16790242	0,1323	2,8939	101,238
15	15,51046737	0,16863555	0,1323	2,8939	101,6801
20	20,46406124	0,16936868	0,1323	2,8939	102,1221
25	25,41765512	0,17010181	0,1323	2,8939	102,5642
30	30,37124899	0,17083494	0,1323	2,8939	103,0062
35	35,32484287	0,17156808	0,1323	2,8939	103,4483

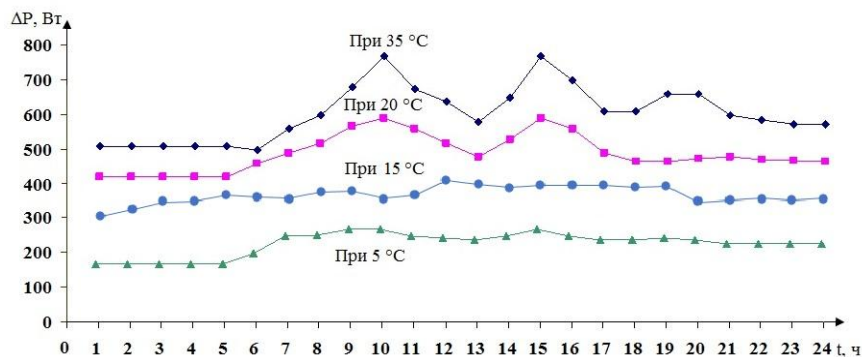


Рис.4. Суточный график изменения потерь мощности линии цеховой сети в зависимости от различных значений температуры окружающей среды

Таким образом, установлено, что с увеличением температуры окружающей среды потери ЭЭ растут. Погрешность расчета потерь ЭЭ, обусловленная неучетом температуры окружающей среды, составляет 10 %. Следовательно, в расчетах требуется отражать фактор влияния температуры окружающей среды.

Для выявления влияния процесса нагревания проводов рассмотрим новый пример, изменив параметры нагрузки. Пусть мощность электроприемника составляет 60 кВт. Сечение кабельной линии 50 мм^2 с $I_0 = 130 \text{ А}$, $r_{20} = 0,589 \text{ Ом/км}$. Постоянная времени нагрева для проводников данного сечения составляет 20 мин. График нагрузки линии и график изменения потерь активной мощности показаны на рис. 5, 6. Сопротивление автоматического выключателя составит в этом случае 2,4 мОм, а предохранителя – 0,5 мОм.

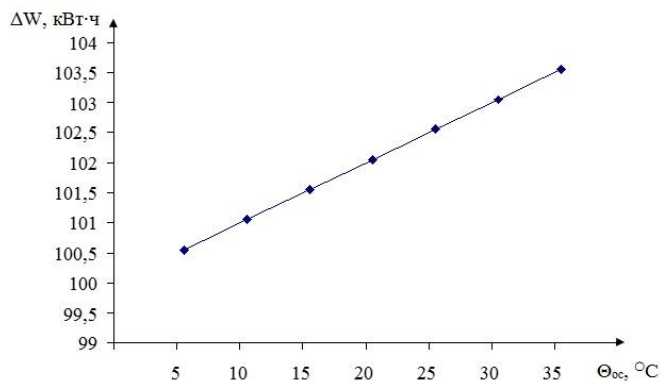


Рис. 5. График зависимости потерь электроэнергии от температуры окружающей среды

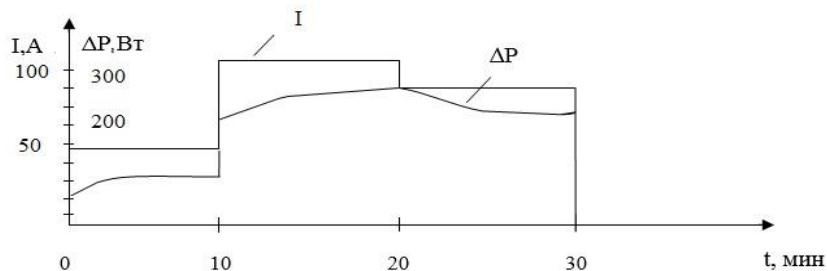


Рис.6. Графики изменения потерь мощности линии с учетом нагревания проводов

Как показали расчеты, в данном случае потери ЭЭ не являются постоянными за расчетный промежуток времени. Следовательно, при определении потерь необходимо учитывать нагревание проводов, если расчетный интервал времени соизмерим с постоянной времени нагревания проводов.

Рассмотрим влияние коэффициента загрузки линии на величину потерь ЭЭ. Примем, что коэффициент загрузки находится в пределах 0,3–1,5. Результаты расчета потерь ЭЭ представлены в табл. 4. График зависимости величины потерь ЭЭ от загрузки линии показан на рис. 7.

По результатам исследований в данном случае потери ЭЭ растут с увеличением тока линии. Неучет k_3 при расчете потерь ведет к погрешности, равной приблизительно 12 %. Следовательно, при определении потерь ЭЭ необходимо учитывать нагревание проводников вследствие прохождения тока нагрузки.

Таблица 4

Результаты расчетов потерь ЭЭ при различных коэффициентах загрузки линии

k_3	Температура провода, °C	R_3 , Ом	Сопротивление ком. аппаратов, Ом	$I_{\text{ср.кв}}$, А	Потери ЭЭ, кВт·ч
0,3	24,5	0,3697336	0,1812	13,8507	5107,006
0,5	32,5	0,37566	0,1812	13,8507	5188,865
0,8	52	0,3901056	0,1812	13,8507	5388,398
1	70	0,40344	0,1812	13,8507	5572,581
1,3	104,5	0,4289976	0,1812	13,8507	5925,6
1,5	132,5	0,44974	0,1812	13,8507	6214,108

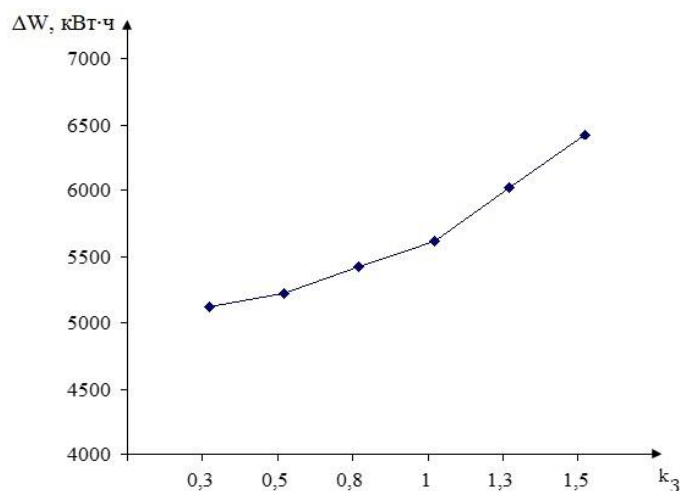


Рис.7. График зависимости потерь электроэнергии от загрузки линии

Покажем, как влияет на величину потерь ЭЭ неучет сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов. На рис.1 показана радиальная цеховая сеть, на линиях которой установлено различное количество коммутационных аппаратов (от 2 до 6).

Проведем расчет потерь ЭЭ при температуре окружающей среды 20 °C для линии
- с учетом сопротивлений коммутационных аппаратов:

$$\Delta W = 3 \cdot 2,8939^2 \cdot 0,1694 \cdot 24 = 102,1221 \text{ кВт·ч},$$

- без учета сопротивления коммутационных аппаратов:

$$\Delta W = 3 \cdot 2,8939^2 \cdot 0,0371 \cdot 24 = 22,3508 \text{ кВт·ч}.$$

Для остальных линий результаты расчета потерь ЭЭ приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты вычислений потерь электроэнергии с учетом и без учета сопротивлений коммутационных аппаратов с указанием погрешности расчета

№ линии	Температура провода, °С	Rэ, Ом	Сопротивление ком. аппаратов, Ом	I _{ср.кв} , А	Потери ЭЭ с учетом	Потери ЭЭ без учета	Погрешности от неучета, %
2,7	20,4641	0,1694	0,1323	2,894	102,122	22,351	78
3,8	22,3548	0,2235	0,1488	6,834	751,498	251,17	66
4,9	24,7811	0,2473	0,1765	8,844	1392,64	397,79	72
5,10	32,4637	0,2784	0,1812	13,85	3845,67	1342,8	65
6,11	24,0378	0,3618	0,2207	7,699	1544,07	602,29	61

Как показывают расчеты, неучет сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов дает достаточно большие погрешности определения потерь ЭЭ – до 80%.

Оценим влияние вида графика нагрузки на результаты определения потерь ЭЭ. Суточные графики нагрузки характеризуются коэффициентом формы (K_ϕ). Для электрических нагрузок большинства промышленных предприятий значение K_ϕ обычно находится в пределах 1,01–1,1. Меньшие значения K_ϕ соответствуют электрическим нагрузкам с большим числом приемников (например, вся электрическая нагрузка цеховой заводской подстанции); большие значения относятся к электрическим нагрузкам с меньшим числом приемников (например, какая-либо линия, отходящая от подстанции).

Потери ЭЭ цеховой сети определяются по выражению

$$\Delta W = 3 \cdot K_\phi^2 \cdot I_{ср}^2 \cdot R_\Sigma \cdot T,$$

где R_Σ – эквивалентное сопротивление сети; T – расчетный период определения потерь ЭЭ; $I_{ср}$ – средний ток участка сети; K_ϕ (определяем по суммарному графику нагрузки) равен 1,045.

Для суммарного графика нагрузки определим потери ЭЭ:

- с учетом K_ϕ :

$$\Delta W = 1,045 \cdot 3 \cdot 38,9028^2 \cdot 1,5659 \cdot 24 = 178,310 \text{ МВт} \cdot \text{ч},$$

- без учета K_ϕ :

$$\Delta W = 3 \cdot 38,9028^2 \cdot 1,5659 \cdot 24 = 170,631 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, расчеты показали, что погрешность от неучета формы графика нагрузки при определении потерь ЭЭ лежит в пределах 10%.

На рис. 8 показана диаграмма погрешностей вычислений от неучета основных параметров электрооборудования (факторов) при определении величины потерь ЭЭ в цеховых сетях низкого напряжения.

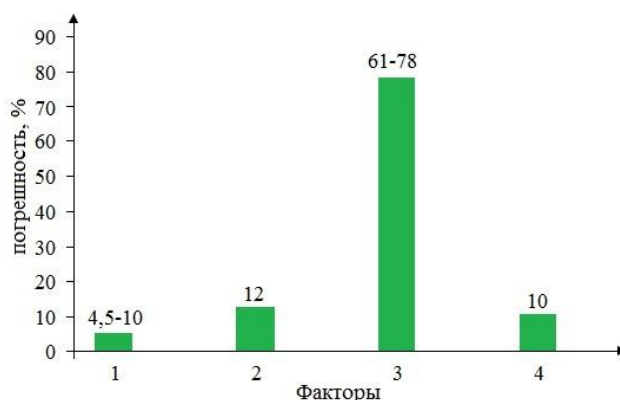


Рис. 8. Результаты оценки погрешностей от неучета основных факторов: 1 – неучет температуры окружающей среды; 2 – неучет процесса нагревания проводников током нагрузки; 3 – неучет сопротивлений коммутационных аппаратов; 4 – неучет вида графика нагрузки

Выводы

Анализ параметров электрооборудования систем промышленного электроснабжения показал, что при оценке величины потерь ЭЭ в цеховых сетях необходимо учитывать влияние следующих факторов: нагрева проводников, обусловленного прохождением тока нагрузки и температурой окружающей среды; сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов и их числа, так как линии цеховых сетей имеют большое количество последовательных узлов с контактными соединениями и, при этом, сопротивление аппарата оказывается соизмеримым с сопротивлением линии; вида графика нагрузки; температуры окружающей среды. Отсутствие достоверной информации об элементах цеховых сетей низкого напряжения и неучет основных схемных и режимных параметров, определяющих эти параметры, ведет к погрешности от 5 до 80 % при вычислении потерь ЭЭ в сетях промышленного электроснабжения.

Литература

1. Грунтович Н.В., Ефремов Л.Г., Федоров О.В. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий // Вестник Чувашского университета. 2015. №3. С. 40–48.
2. Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А. О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. 2014. С. 330–332.
3. Баринов В.А. Совершенствование нормативов надежности функционирования электроэнергетических систем / В.А. Баринов, Г.А. Вояков, В.В. Калита, Ф.Л. Коган, А.С. Маневич, В.В. Могилев, Ф.И. Синьчугов и др. // Электричество. 1993. №7. С. 17–23.
4. Крюков О.В., Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах. // Двигателестроение. 1987. №7.
5. Рябчицкий М.В. Низковольтные коммутационные (силовые) аппараты для нужд электроэнергетики / М.В. Рябчицкий, Д.Н. Нечаев, А.В. Кокорин // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2014. №8 (61). С.4–10.
6. Бондарь Н.Ф., Федосеева А.В. Прогнозирование электропотребления промышленного предприятия // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2005. №15. С. 101–105.

7. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на эффективность функционирования систем электроснабжения // Вести вузов Черноземья. 2013. №2. С.25–32.
8. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Оценка эффективности безотказности. // Вести вузов Черноземья. 2013 №1. С.25–33.
9. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Квашина Г.В. К оценке параметров безотказности оборудования систем электроснабжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. №4. С. 48–56.
10. Голубцов Н.В., Ефремов Л.Г., Федоров О.В. Проблема эффективности использования энергоресурсов // Вестник Чувашского университета. 2014. №2. С.18–22.
11. Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Оценка ресурсосбережения электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. №3. С. 24–28.
12. Егоров А.Н, Кузнецов Н. М., Федоров О.В. Влияние электропривода с вентильным преобразователем на качество электрической энергии // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2010. № 7. С. 21–23.
13. Сарваров А.С., Шевырëв Ю.В., Фëдоров О.В. Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15, № 3. С 11–19.
14. Yu-Lung L., Hong W., Jing-Gin C. Simulation and reliability analysis of shunt active power theory // Journal of Zhejiang University Science. 2007. №3. P. 416–421.
15. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. №1. P.40–46.
16. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
17. Graovac D., Katic V., Rufer A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. №4. P. 32–38.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Алимова Алсу Нурхайдаровна – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Gruntovich N.V., Efremov L.G., Fedorov O.V. Enhancement of management systems energetic efficiency and economic safety of the industrial enterprises. //Bulletin of the Chuvash university. 2015. No. 3. P. 40–48.
2. Nemtsev A.G., Fedorov O.V., Shestakova L.A. About vibration of electromotors in the presence of the higher harmonic components in power supply tension // Works VIII international (the XIX All-Russian) conferences on the automated AEP-2014 electric drive in 2 volumes. 2014. P. 330–332.
3. Barinov V.A. Enhancement of standards of reliability of functioning of electrical power systems/V.A. Barinov, G.A. Voyakov, V.V. Kalita, F.L. Kogan, A.S. Manevich, V.V. Mogilev, F.I. Sinchugov, etc.//Electricity. 1993. No. 7. P. 17–23.
4. Kryukov O.V., Leonov V.P., Fedorov O.V. Application of microprocessor technique in the loading devices. // Engine building. 1987. No. 7.
5. Ryabchitsky M.V. Low-voltage switching (force) devices for needs of power industry / M.V. Ryabchitsky, D.N. Nechayev, A.V. Kokorin//Automation and IT in power engineering. 2014. No. 8 (61) P. 4–10.

6. Cooper N.F., Fedoseyeva A.V. Prediction of a power consumption of the industrial enterprise//Messenger of mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Separation of metallurgy. 2005. No. 15. P. 101–105.
7. Spiranovic A.A. Analysis of influence of probable parameters of an electric equipment on efficiency of functioning of systems of electrical power supply//Messages of higher education institutions of the Black Earth. 2013. No. 2. P. 25–32.
8. Spiranovic A.N., Spiranovic A.A. Assessment of efficiency of faultlessness. // Messages of higher education institutions of the Black Earth. 2013 No. 1. P. 25–33.
9. Spiranovic A.N., Spiranovic A.A., Kvashnina G.V. To assessment of parameters of faultlessness of the equipment of systems of electrical power supply//Messages of higher educational institutions of the Black Earth. 2016. No. 4. P. 48–56.
10. Stuffed cabbage N.V., Efremov L.G., Fedorov O.V. Problem of efficiency of use of energy resources//Bulletin of the Chuvash university. 2014. No. 2. P. 18–22.
11. Cockerels M.Yu., Sarvarov A. S., Fedorov O.V. totsenska of resource-saving of an electric equipment//Electric equipment: maintenance and repair. 2015. No. 3. P. 24–28.
12. Egorov A. N, Kuznetsov N. M., Fedorov O.V. Influence of the electric drive with the gated transformer on quality of electrical energy//Energy efficiency: experience, problems, decisions. 2010. No. 7. P. 21–23.
13. Sarvarov A. S., Shevryov Yu.V., Fyodorov O.V. Assessment of efficiency of costs of increase in energetic indices on networks with semiconductor transformers//the Bulletin of the Southern Ural State University. Series: Power engineering. 2015. V. 15, No. 3. P. 11–19.
14. Yu-Lung L., Hong W., Jing-Gin C. Simulation and reliability analysis of shunt active power theory // Journal of Zhejiang University Science. 2007. №3. P. 416–421.
15. Ajami A., Hosseini S.H. Implementation of Novel Control Strategy for Shunt Active Filter // Ecti transactions on electrical eng., electronics and communications. 2006. №1. P.40–46.
16. Erickson R.W. Some Topologies of High Quality Rectifiers // First International Conference on Energy, Power and Motion Control. 1997. P. 1–6.
17. Graovac D., Katic V., Rufer A. Universal power quality system – an extension to universal power quality conditioner // international conference on power electronics and motion control. 2000. №4. P. 32–38.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Alimova Alsu Nurkhydarovna – Master's Degree student of the Department "Power Supply of industrial enterprises" (EPP) Kazan state power engineering University (KSPEU).

Поступила в редакцию

21 февраля 2018 г.



ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТЕЛЕ

Ю.В. Видин¹, Р.В. Казаков², В.С. Злобин¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²МОД «Народный контроль в ЖКХ», г. Красноярск, Россия

Резюме: Определение тепловых режимов составных цилиндрических тел аналитическими методами приводит к появлению сложных характеристических уравнений, решением которых является определение собственных чисел. В статье рассмотрен сравнительно простой приближенный аналитический метод определения собственных чисел характеристических уравнений для двухслойного цилиндрического тела при граничных условиях третьего рода. Данный метод также может быть легко использован в более сложных постановках задач теплопроводности.

Ключевые слова: характеристическое уравнение, собственные числа, нестационарное температурное поле, неоднородное цилиндрическое тело.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98.

Для цитирования: Видин Ю.В., Казаков Р.В., Злобин В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 93-98. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98.

THE PROCESS OF HEAT TRANSFER IN TWO-LAYERED CYLINDRICAL BODY

U.V. Vidin¹, R.V. Kazakov², V.S. Zlobin¹

¹Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²People's control in housing and communal services, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: Determination of thermal regimes of composite cylindrical bodies by analytical methods leads to the appearance of complex characteristic equations, the solution of which is the determination of eigenvalues. The article considers a relatively simple approximate analytical method for determining the eigenvalues of characteristic equations for a two-layer cylindrical body under boundary conditions of the third kind. This method can also be easily used in more complex formulations of heat conduction problems.

Keywords: characteristic equation, eigenvalues, non-stationary temperature field, non-uniform cylindrical body.

For citation: U.V. Vidin, R.V. Kazakov, V.S. Zlobin. The process of heat transfer in two-layered cylindrical body. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 93-98. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98.

В монографии [1] представлено аналитическое решение определения нестационарного температурного поля в сплошном цилиндрическом теле, окруженном сравнительно тонкой оболочкой. Автор данной работы, принимая в первом приближении тонкую оболочку близкой к плоской, получил следующие безразмерные математические выражения для этой двухслойной системы:

$$\vartheta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n \psi) \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_2 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \{ & J_0(\mu_n) \cos[\mu_n \sqrt{K_a}(\psi-1)] - \\ & - K_\varepsilon J_1(\mu_n) \sin[\mu_n \sqrt{K_a}(\psi-1)] \} \exp(-\mu_n^2 Fo), \end{aligned} \quad (2)$$

где использованы обозначения:

$$\vartheta_1 = \frac{T_c - T_1(r, \tau)}{T_c - T_0}; \quad \vartheta_2 = \frac{T_c - T_2(r, \tau)}{T_c - T_0}; \quad \psi = \frac{r}{R_1}; \quad Fo = \frac{a_1 \tau}{R_1^2}; \quad K_a = \frac{a_1}{a_2}; \quad K_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}.$$

Причем индекс «1» справедлив для центрального цилиндрического стержня, а «2» – для наружного слоя.

В литературе [1] приведена также развернутая зависимость для расчета коэффициентов рядов A_n .

Основной проблемой при практическом использовании формул (1) и (2) является нахождение собственных чисел данной задачи μ_n , которые при указанном выше допущении должны удовлетворять сравнительно сложному характеристическому уравнению вида [1]

$$\begin{aligned} J_0(\mu) \{ & Bi \cos[\sqrt{K_a}(\psi_0-1)\mu] - \sqrt{K_a} \psi_0 \mu \sin[\sqrt{K_a}(\psi_0-1)\mu] \} - \\ & - K_\varepsilon J_1(\mu) \{ Bi \sin[\sqrt{K_a}(\psi_0-1)\mu] + \sqrt{K_a} \psi_0 \mu \cos[\sqrt{K_a}(\psi_0-1)\mu] \} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где безразмерное число Био рассчитывается по соотношению $Bi = \frac{\alpha R_1}{\lambda_1}$, а геометрический

параметр $\psi_0 = \frac{R_2}{R_1}$.

Очевидно, что, если $\psi_0 = 1$ (оболочка отсутствует), выражение (3) вырождается в хорошо известное соотношение [1, 2]:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi}, \quad (4)$$

справедливое для сплошного однородного бесконечного цилиндрического тела.

Первые шесть корней этого уравнения в зависимости от числа Bi приведены в [1, 2]. Кроме этого, в работах [3–5] предложены весьма эффективные аналитические методы для определения собственных чисел μ_n уравнения типа (4) для любых величин Bi ($0 \leq Bi < \infty$) и при любом порядковом номере n . Значительно сложнее определить корни μ_n по уравнению (3), которое содержит намного больше исходных параметров, что, как известно, свойственно задачам теплопроводности многослойных конструкций [6–8]. Поэтому разработка оперативных инженерных способов решения уравнений класса (3) представляет как математический, так и прикладной интерес.

На первом этапе, по-видимому, целесообразно установить для заданных исходных значений K_a , K_ε и ψ_0 возможные предельные величины μ_n . Для этого, очевидно, необходимо исследовать данную зависимость для случаев, когда $Bi = 0$ и $Bi \rightarrow \infty$.

Тогда формула (3) принимает соответствующие более простые выражения:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = -K_\varepsilon \operatorname{ctg} [\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu], \quad (5)$$

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = K_\varepsilon \operatorname{tg} [\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu]. \quad (6)$$

Нетрудно показать, что зависимости (5) и (6) в случае, когда параметр $\psi_0 = 1$ (т.е. внешнего слоя нет), вырождаются в уравнение (4) для указанных предельных величин Bi . Следовательно, известные корни μ_n этого уравнения для $Bi = 0$ и $Bi \rightarrow \infty$ могут рассматриваться как некоторые граничные значения. В табл. 1, в частности, приведены первые три корня μ_n соотношения (4) [1, 2].

Указанные в табл. 1 диапазоны могут быть откорректированы. Так, в частности, если использовать аппроксимацию

$$\operatorname{tg} [\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu] = \sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu, \quad (7)$$

Таблица 1

Значения первых корней уравнения (4) для $Bi = 0$ и $Bi \rightarrow \infty$

Bi	μ_1	μ_2	μ_3
0	0	3,8317	7,0156
∞	2,4048	5,5201	8,6537

которая является наиболее простым и близким приближением на интервале

$0 \leq \sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu \leq 0,5$, то тогда выражение (6) примет вид

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi^*}, \quad (8)$$

где фиктивное число Bi^*

$$Bi^* = \frac{1}{K_\varepsilon \sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)}. \quad (9)$$

Формула типа (8), как отмечалось ранее, подробно исследована в работах [1–5] и поэтому нахождение ее корней μ_n не представляет затруднений.

Рассмотрим следующий конкретный пример.

Предположим, что параметры $\sqrt{K_a}$, K_ε и ψ_0 соответственно равны $\sqrt{K_a} = 0,5$, $K_\varepsilon = 0,5$ и $\psi_0 = 1,2$, что свойственно сравнительно значительному по толщине слою налагаемого материала, обладающему более высокой теплопроводностью по сравнению с центральным телом. Тогда условное число Bi^* будет равно

$$Bi^* = \frac{1}{K_\varepsilon \sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)} = \frac{1}{0,5 \cdot 0,5 \cdot (1,2 - 1)} = 20.$$

При такой величине Bi^* первый корень μ_1 уравнения (8), согласно [1], равен $\mu_1 = 2,2880$ и, следовательно, предложенная аппроксимация (7) в данном случае вполне допустима, так как комплекс $\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu_1 = 0,5(1,2 - 1)2,2880 = 0,2288 < 0,3$.

Если же необходимо вычислить μ_1 с более высокой точностью, то можно найти второе приближение на основе соотношения

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = K_\varepsilon \operatorname{tg} [\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu_1] = 0,5 \operatorname{tg} [0,5(1,2 - 1)2,2880] = 0,11644.$$

Отсюда следует, что $\mu_1 = 2,286$, т.е. наблюдается незначительное уточнение.

Принципиально подобный подход применим и для поиска значений μ_n и более высоких порядков. Так первое приближение для второго корня μ_2 при $Bi^* = 20$ на основе [1] равняется $\mu_2 = 5,2568$. Второе приближение находится из условия

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = K_\varepsilon \operatorname{tg} [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu_2] = 0,5 \operatorname{tg} [0,5(1,2 - 1)5,2568] = 0,2901,$$

что соответствует $\mu_2 = 5,23$. Эта величина позволяет найти третье приближение по той же схеме, которое будет мало отличаться от уже полученного.

Третий корень μ_3 рассчитывается аналогичным образом. Из [1] находим первое приближение для $\mu_3 = 8,2534$. Следовательно, второе приближение можно выявить из условия

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = K_\varepsilon \operatorname{tg} [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu_2] = 0,5 \operatorname{tg} [0,5(1,2 - 1)8,2534] = 0,5416.$$

Отсюда имеем $\mu_3 = 8,143$. Далее более точное приближение будет $\mu_3 = 8,152$. Последующие итерации проводить нецелесообразно, так как этот процесс очень быстро сходится.

Результаты выполненных конкретных расчетов показывают, что предлагаемый несложный метод нахождения предельных величин первых собственных чисел μ_n обладает приемлемой точностью, если безразмерный комплекс $\sqrt{K_a}(\psi_0 - 1)\mu$ даже превышает ограничение 0,5.

Аналогичным образом осуществляется оценка минимальных значений μ_n для $Bi = 0$. Для этого можно использовать условие (5), из которого, например, следует, что $\mu_1 = 0$. Применяя выражение (5), удастся найти μ_2 , μ_3 и т.д. Если взять за базовое значение $\mu_2 = 3,8317$ (табл.1), то методом последовательного приближения с помощью уравнения (5) можно вычислить фактический корень μ_2 , который для ранее принятых параметров $\sqrt{K_a}$, K_ε и ψ_0 будет равен $\mu_2 = 3,276$. Точно также, принимая за исходную величину $\mu_3 = 7,0156$, находится истинное значение $\mu_3 = 6,114$. В табл. 2 приведены рассчитанные предложенным методом μ_1 , μ_2 и μ_3 для случая $\sqrt{K_a} = 0,5$, $K_\varepsilon = 0,5$ и $\psi_0 = 1,2$, когда $Bi = 0$ и $Bi \rightarrow \infty$.

Таблица 2

Значения первых трех корней уравнений (5) и (6)
при $\sqrt{K_a} = 0,5$, $K_\varepsilon = 0,5$ и $\psi_0 = 1,2$

Bi	μ_1	μ_2	μ_3
0	0	3,276	6,114
∞	2,286	5,230	8,152

Для упрощения процедуры вычисления предельных величин μ_n с помощью уравнений (5) и (6) полезно использовать табл. 3, в которой приведены значения функции $y = \frac{J_0(x)}{J_1(x)}$ в интервале аргумента $0 \leq x \leq 10$, рассчитанные на основе данных, имеющихся в работе [8].

Зависимость (3) достаточно просто может быть преобразована к виду

$$Bi = \frac{\sqrt{K_a} \psi_0 \mu \left\{ \frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} \sin [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu] + K_\varepsilon \cos [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu] \right\}}{\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} \cos [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu] + K_\varepsilon \sin [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1) \mu]}, \quad (10)$$

на основе которой при заданном корне μ вычисляется соответствующее ему число Bi .

Таблица 3

Значения отношений функций Бесселя $\frac{J_0(x)}{J_1(x)}$

x	$\frac{J_0(x)}{J_1(x)}$	x	$\frac{J_0(x)}{J_1(x)}$	x	$\frac{J_0(x)}{J_1(x)}$
0		0,50	3,847	1,50	0,917
0,05	39,991	0,60	3,181	1,60	0,799
0,10	19,947	0,70	2,678	1,70	0,689
0,15	13,296	0,80	2,294	1,80	0,585
0,20	9,950	0,90	1,989	1,90	0,485
0,25	7,937	1,00	1,739	2,00	0,388
0,30	6,591	1,10	1,528	2,10	0,293
0,35	5,626	1,20	1,347	2,20	0,199
0,40	4,899	1,30	1,188	2,30	0,103
0,45	4,331	1,40	1,046	2,40	0,005

Так, например, если принять $\mu_1 = 1$, то по соотношению (10) находим

$$Bi = \frac{\sqrt{K_a} \psi_0 \left\{ \frac{J_0(1)}{J_1(1)} \sin [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1)] + K_\varepsilon \cos [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1)] \right\}}{\frac{J_0(1)}{J_1(1)} \cos [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1)] + K_\varepsilon \sin [\sqrt{K_a} (\psi_0 - 1)]} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 1,2 \cdot \{1,74 \sin [0,5 \cdot (1,2 - 1)] + 0,5 \cos [0,5 \cdot (1,2 - 1)]\}}{1,74 \cos [0,5 \cdot (1,2 - 1)] - 0,5 \sin [0,5 \cdot (1,2 - 1)]} = 0,24.$$

Аналогичным способом вычисляется Bi , если взять $\mu_1 = 2$. Тогда, согласно (10), оно будет равно $Bi = 2,42$.

Следовательно, для рассматриваемого варианта $\sqrt{K_a} = 0,5$, $K_\varepsilon = 0,5$ и $\psi_0 = 1,2$ является справедливым такой результат:

- 1) при $0 \leq Bi \leq 0,24$ $0 \leq \mu_1 \leq 1$; 2) при $0,24 \leq Bi \leq 2,42$ $1 \leq \mu_1 \leq 2$;
3) при $2,42 \leq Bi < \infty$ $2 \leq \mu_1 \leq 2,286$.

Таким образом, сравнительно просто аналитическим путем устанавливаются узкие зоны для нахождения искомых корней μ_n .

Рекомендованный подход также может быть эффективно использован и в случае анализа задач теплопереноса при некоторых иных видах граничных условий [9, 10].

Литература

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Издательство «Наука», 1964. 487 с.
3. Видин Ю.В., Казаков Р.В. Определение собственных значений высокого порядка в задаче теплопроводности цилиндрического тела // Известия Российской академии наук: Энергетика. 2017. №4. С. 143–150.
4. Видин Ю.В., Злобин В.С., Иванов Д.И. Нестационарный теплоперенос в неоднородных конструкциях криволинейной конфигурации. Красноярск : СФУ, 2016. 167 с.
5. Видин Ю.В., Иванов В.В., Казаков Р.В. Инженерные методы расчета задач теплообмена. Красноярск : СФУ, 2014. 157 с.
6. Tittle C.W., Robinson L.V. The analytical solution of conduction problems in composite media. The American society of mechanical engineers. 1965. P.1–4.

7. Fritz Kramer. Berechnung endimensionaler, nich-stationärer Warmestromungen durch mehrschichtige Wände mittels Differenzenverfahren. Forsch. Ingenieurwes., 1966. 32, № 6. P. 165–174.
8. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. М.: Государственное издание физико-математической литературы, 1962. 450 с.
9. Стефанюк Е.В., Еремин А.В., Кузнецова А.Э., Абишева Л.С. Аналитические решения задач теплопроводности с переменными во времени коэффициентами теплоотдачи // Шестая российская национальная конференция по теплообмену 27–31 октября 2014 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 225–226.
10. Кудинов В.А., Кудинов И.В., Скворцова М.П. Обобщенные функции и дополнительные граничные условия в задачах теплопроводности для многослойных тел // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Том 55, №4. С. 669–680.

Авторы публикации

Видин Юрий Владимирович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Политехнического института Сибирского федерального университета (ПИ СФУ). E-mail: zlobinsfu@mail.ru.

Казakov Роман Владимирович – канд. техн. наук, председатель МОД «Народный контроль в ЖКХ». E-mail: roman.kazakov@list.ru.

Злобин Виктор Семенович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» Политехнического института Сибирского федерального университета (ПИ СФУ). E-mail: zlobinsfu@mail.ru.

References

1. Lykov, A.V. the Theory of thermal conductivity. M.: Higher school, 1967. 600 p.
2. Carslaw, Eger D. thermal Conductivity of solids. M.: Publishing house "Nauka", 1964. 487 p.
3. Vidin Y.V., Kazakov R.V. determination of eigenvalues of high order in the problem of thermal conductivity of a cylindrical body // «Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering» Journal. 2017. № 4. P. 143–150.
4. Vidin Y.V., Zlobin V.S., Ivanov D.I. Unsteady heat transfer in inhomogeneous structures of curvilinear configuration. Krasnoyarsk : SFU, 2016. 167 p.
5. Vidin V.V., Ivanov V.V., Kazakov R.V. Engineering methods of calculation of heat transfer problems. Krasnoyarsk : SFU, 2014. 157 p.
6. Tittle C.W., Robinson L.V. The analytical solution of conduction problems in composite media. The American society of mechanical engineers. 1965. P. 1–4.
7. Fritz Kramer. Berechnung endimensionaler, nich-stationärer Warmestromungen durch mehrschichtige Wände mittels Differenzenverfahren. Forsch. Ingenieurwes. 1966. 32, № 6. P. 165–174.
8. Segal B.I., Semendyaev K.A. Five-figure mathematical tables. M.: The state publishing of physical and mathematical literature, 1962. 450 p.
9. Stefanyuk, E.V., Eremin, A.V., Kuznetsova, A.E., Abisheva, L.S. Analytical solutions of heat conductivity problems with variable heat transfer coefficients in time // The sixth Russian national conference on heat transfer from 27 to 31 October 2014. M.: MPEI Publishing house, 2014. P. 225–226.
10. Kudinov V., Kudinov I. V., Skvortsova M. P. Generalized functions and additional boundary conditions in heat conduction problems for multilayer bodies // Journal of computational mathematics and mathematical physics, 2015. Volume 55, №4. P. 669–680.

Authors of the publication

Yury V. Vidin – PhD in Engineering sciences, Professor of the Department "Thermal power stations" of the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University (PI SFU). E-mail: zlobinsfu@mail.ru.

Roman V. Kazakov – PhD in Engineering sciences, Director of the MOD "People's control in housing and communal services". E-mail: roman.kazakov@list.ru.

Viktor S. Zlobin – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department "Thermal power stations" of the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University (PI SFU). E-mail: zlobinsfu@mail.ru.

Поступила в редакцию

15 октября 2018 г.



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Л.В. Фетисов, Н.В. Роженцова, О.А. Булатов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

Резюме: Данная статья посвящена разработке мероприятий по повышению качества электроэнергии в сетях низкого напряжения, путём установки вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), и расчёту экономического эффекта в сравнении с альтернативными вариантами решения задач по обеспечению надёжного, качественного и доступного электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, повышение качества электроэнергии, электроснабжение потребителей, экономический эффект.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.

Для цитирования: Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 99-106. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN LOW VOLTAGE NETWORKS

L.V. Fetisov, N.V. Rozhencova, O.A. Bulatov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Abstract: This article is devoted to development of actions for improvement of quality of the electric power in low voltage networks, by installation of booster transformers (BT), and to calculation of economic effect in comparison with alternative versions of the solution of tasks of ensuring reliable, high-quality and available power supply of consumers.

Keywords: the booster transformer, improvement of quality of the electric power, power supply of consumers, economic effect.

For citation: L.V. Fetisov, N.V. Rozhencova, O.A. Bulatov. Improving the quality of electric power in low voltage networks. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 99-106. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.

Для электросетевых компаний России и мира соблюдение нормативного уровня напряжения является актуальной проблемой. Как в производстве, так и в быту применяется

множество электроприборов, в состав которых входят элементы, достаточно чувствительные к изменениям напряжения от допустимых значений. Сбой в их работе может обусловить выход из строя оборудования или расстройство технологических процессов. В свою очередь, это может привести к экономическим потерям для электросетевых компаний, так как потребитель вправе потребовать не только замену вышедшего из строя оборудования, но и денежные средства за недопоставку электрической энергии.

Выбор темы обоснован необходимостью повышения качества электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения с большей интенсивностью за счёт установки вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ), ускоряющих решение проблем по падению напряжения на устаревших воздушных линиях, а также обеспечивающих экономию материальных средств.

В любых электросетевых компаниях есть такие объекты, с которых постоянно поступают жалобы от потребителей на качество электроэнергии. Основной причиной является большая протяженность воздушных линий (ВЛ), которые изначально при строительстве не были рассчитаны на такое количество новых подключений.

Список основных показателей качества электрической энергии регламентируется ГОСТ 32144-2013 (вступил в силу 1 июля 2014 года) и выглядит следующим образом:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- коэффициент временного перенапряжения и т.п.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Восстановить уровень напряжения до допустимого можно следующими способами: путем реконструкции старой линии 0,4 кВ с увеличением номинальных сечений проводников; строительством новой линии 0,4 кВ или подведением более высокого класса напряжения ближе к потребителю со строительством новой понижающей трансформаторной подстанции. Данные способы требуют значительных финансовых вложений, а также времени для их реализации.

В качестве примера по установке ВДТ рассмотрим филиал ОАО «Сетевая компания» Альметьевские электрические сети Республики Татарстан, подразделение Альметьевских районных электрических сетей, где по сей день решается проблема «старых», неэффективных сетей, спроектированных в 70-х гг. прошлого века без учета существующего сегодня роста нагрузок. Потребность в реконструкции старых линий есть по нескольким объектам, а финансирование в ближайшие годы планируется не по всем объектам. Проблемные участки с частыми жалобами потребителей на низкое напряжение существуют во многих населенных пунктах Альметьевского района Республики Татарстан. Соответственно, целесообразность применения ВДТ в сети 0,4кВ для повышения качества и стабилизации напряжения как временной меры до реконструкции объекта имеет место быть.

Вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) – электрический трансформатор с переменным коэффициентом трансформации, включаемый своей вторичной обмоткой последовательно в цепь вторичной обмотки другого трансформатора для регулирования или стабилизации напряжения в цепи нагрузки. Первичная обмотка ВДТ питается через регулируемый автотрансформатор низшего напряжения основного трансформатора. Разновидность ВДТ – линейные трансформаторы для поперечного регулирования,

позволяющие сдвигать по фазе напряжение сети, не изменяя его значения. В этом случае первичная обмотка регулируемого автотрансформатора каждой фазы включается на линейное напряжение двух других фаз. Вследствие улучшения коэффициента мощности достигается снижение потерь напряжения в электрической сети.

Вольтодобавочный трансформатор (бустер) – устройство, которое устанавливается в непосредственной близости от потребителей, имеющих пониженное напряжение, для его повышения. Изделия компактно, габариты составляют 482 мм в ширину, 360 мм в глубину и 974 мм в высоту. Монтируется на одностоечной опоре и имеет массу не более 170 кг. Основа бустера – это три автотрансформатора с пошаговым регулированием уровня выходного напряжения отдельно от каждой фазы. Время срабатывания устройства (время стабилизации уровня напряжения) составляет 300 мс. Необходимые защитные устройства, ограничители перенапряжений и предохранители уже входят в комплект устройства.

На рис. 1 показана принципиальная схема включения вольтодобавочного трансформатора.

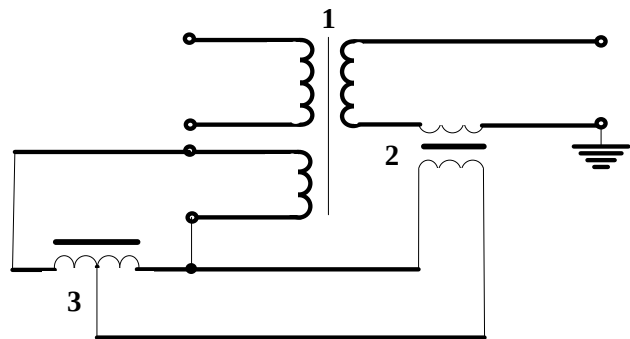


Рис. 1. Принципиальная схема включения вольтодобавочного трансформатора: 1–основной трансформатор; 2 – вольтодобавочный трансформатор; 3 – автотрансформатор

После поступления многочисленных жалоб на низкое напряжение от потребителей было решено исправить данную проблему путем установки ВДТ-45 кВА компании *Ensto-Booster VB45K-3P-003*. В табл. 1 приведены его основные технические характеристики.

Таблица 1

Технические характеристики VB45K3P

Основные характеристики	Значения
Номинальная мощность, кВА	45
Номинальный ток, А	3x65
Максимальный ток на входе, А	3x75
Корпус	Окрашенная оцинкованная сталь, IP55
Сеть	220В AC 50 Гц 3-фазы TN (TN-C)
Время стабилизации, мс	300
КПД, %	98
Масса, кг	170
Уровни регулирования	20% ($U_{вх} = 165 \dots 198 \text{ В}$) 13,3% ($U_{вх} = 198 \dots 209 \text{ В}$) 6,5% ($U_{вх} = 209 \dots 222 \text{ В}$)
Байпас по пониженному напряжению	$U_{вх} > 222 \text{ В}$
Байпас по нормальному напряжению	$U_{вх} < 165 \text{ В}$
Допустимая температура окружающей среды, °C	-50...+60

После установки вольтодобавочного трансформатора были произведены замеры уровня напряжения прибором Энерготестер ПКЭ на участке до установленного ВДТ, а также в конце линии до и после установки бустера. Длина ВЛ-0,4кВ от распределительного устройства-0,4кВ (РУ-0,4кВ) до концевой опоры составляет 0,796 км, марка провода – А-35. После снятия суточных значений уровня напряжения получились следующие результаты (рис. 2), где U_A , U_B , U_C - напряжение на фазах A , B , C соответственно.

Из векторной диаграммы на рис. 2 видно, что уровень напряжения на входе в ВДТ в норме и соответствует ГОСТ 32144-2013, длина магистральной линии от РУ-0,4кВ до установленного ВДТ составляет 0,6 км.

На векторной диаграмме (рис. 3) показаны значения напряжения в конце линии до установки бустера. Во время пиковых нагрузок (с 6:00 до 8:00 и с 17:00 до 23:00) уровень напряжения падает до значений, приближенных к допустимому отклонению напряжения: $\pm 10\%$. Подключение еще одного потребителя к данной линии может привести к расстройству технологического процесса и, как следствие, к нарушениям в работе электрооборудования у потребителей.

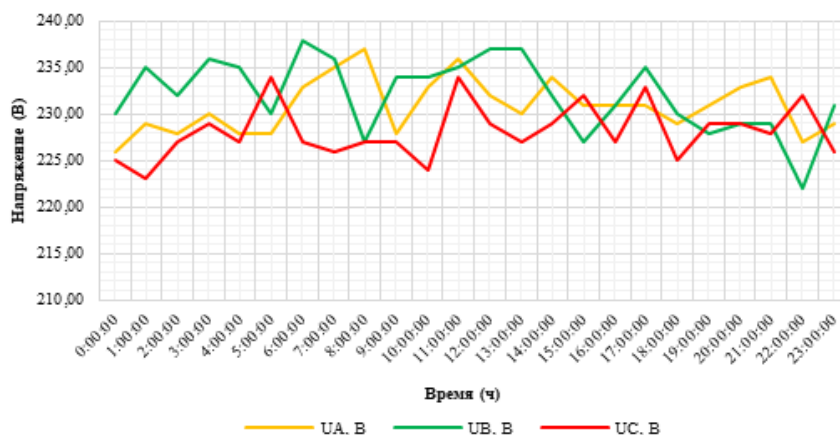


Рис. 2. Векторная диаграмма. Уровень напряжения на входе в ВДТ ($U_{вх}$)

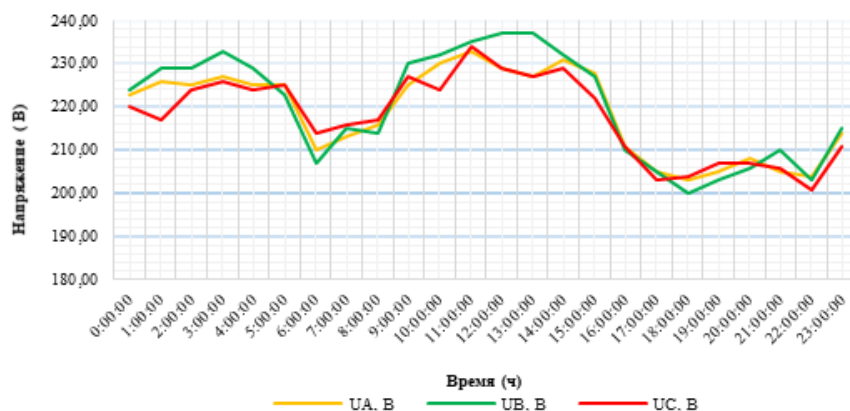


Рис. 3. Векторная диаграмма. Напряжение в конце линии до установки ВДТ

После установки ВДТ произведенные замеры показали, что напряжение у потребителя в конце линии значительно повысилось и стабилизировалось на уровне, превышающем номинальное ($U_{ном}=220В$) на 1–7%, что изображено на векторной диаграмме рис. 4.

Значения фазного напряжения в конце линии длиной 0,796 км после установки вольтодобавочного трансформатора полностью соответствуют пределам, установленным в ГОСТ 32144-2013.

До 2013 года в России, вследствие роста нагрузок и падения напряжения в конце некоторых линий электропередач (ЛЭП), задача по восстановлению уровня напряжения до допустимых значений решалась путем реконструкции ЛЭП, строительством новой ВЛ-0,4 кВ или установкой понижающей трансформаторной подстанции ближе к проблемному участку.

Сейчас же можно решить данную проблему путем установки ВДТ.

Рассмотрим 3 варианта и сравним: трудозатраты работников, использованные материалы для улучшения качества электроэнергии потребителей, а также пусконаладочные работы – это комплекс работ, выполняемых в период подготовки и проведения индивидуальных испытаний и комплексного опробования оборудования.

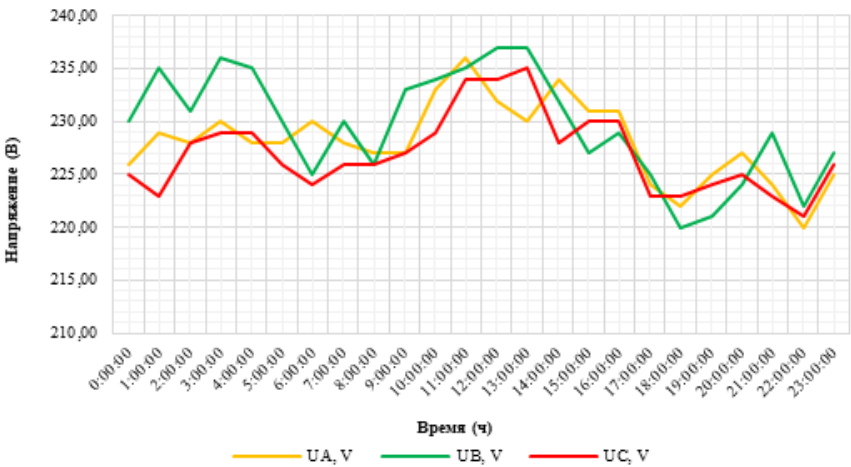


Рис. 4. Векторная диаграмма. Напряжение в конце линии после установки ВДТ

В качестве примера сравним три варианта:

1 – реконструкция ЛЭП с заменой провода на провод с большим сечением. Выбрана марка провода СИП-2 3х50+1х54,6.

2 – строительство участка ВЛ-6кВ с установкой ТП и строительство участка ВЛ-0,4 кВ до потребителей.

3 – установка ВДТ на существующей ЛЭП-0,4 кВ.

Стоимость затрат на осуществление модернизации приведена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ методов по устранению низкого напряжения у потребителей

Объем работ*	Варианты модернизации		
	1 вариант	2 вариант	3 вариант
Стоимость материалов	218368	1932487	691008
Стоимость монтажа	44020	168042	24 869
Стоимость пусконаладочных работ	17767	42651	2735
ИТОГО	280155	2143180	718612
*Все цены указаны в российских рублях (по состоянию на 2018 год)			

Таким образом, из табл. 2 видно, что наиболее дорогостоящим методом по устранению низкого напряжения у потребителей является 2 вариант - строительство участка

ВЛ – 6 кВ с установкой ТП и строительство участка ВЛ – 0,4 кВ до потребителей. Этот вариант применяется реже не только из-за его дороговизны, но и из-за отсутствия места для строительства в населенных пунктах. При этом данный метод является наиболее надежным из представленных и может применяться в случае большой перспективы развития сетей в конкретной локации.

1 вариант – реконструкция ЛЭП с заменой провода на провод с большим сечением по затратам на материалы (провод, лента крепления, кронштейны, хомуты, ответвительные и анкерные зажимы, скрепа и т.п.) является наиболее выгодным, но при оперативном обслуживании не представляется возможным. Это объясняется тем, что сетевые организации закладывают бюджет на капитальный ремонт и строительство новых линий заблаговременно. А когда встает вопрос о скором разрешении проблемы по обеспечению качественной электроэнергии у потребителей, возникает множество нюансов, которые не позволяют оперативно решить проблему. Прежде всего, это заказ оборудования и материалов, который во многих сетевых организациях проходит поквартально.

Что же касается 3 варианта – установки ВДТ на существующей ЛЭП – 0,4 кВ, то здесь можно отметить, что при планировании бюджета на будущий год можно заложить несколько вольтодобавочных трансформаторов в зависимости от количества обслуживаемых электросетей и использовать их при необходимости. Преимуществом ВДТ является так же и возможность перенести ВДТ с одного проблемного участка на другой. На объектах, где решение вопроса низкого напряжения требует работ капитального характера, ВДТ можно применять как временное решение вопроса с дальнейшим разукрупнением или реконструкцией ВЛ-0,4кВ. Таким образом, можно максимально быстро отреагировать на жалобу без срочных капиталовложений. А со временем, когда будут проведены работы капитального характера и ВДТ будет не нужен, его легко можно перенести на другой объект, требующий стабилизации и повышения напряжения.

ВДТ наиболее эффективно использовать как завершающее решение проблемы низкого напряжения на ВЛ 0,4 кВ большой протяженности при отсутствии возможности разукрупнения ВЛ, в стесненных условиях, где нет возможности подвода сети 6 (10) кВ, нет возможности установить дополнительную комплектную трансформаторную подстанцию (КТП) или затраты на разукрупнение ВЛ-0,4кВ в несколько раз превосходят стоимость установки ВДТ.

Литература

- 1.Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Increasing the efficiency of using booster transformers with segmented winding composed of AC voltage stabilizer // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2016. №45. С. 86–92.
- 2.Vlasayevsky S., Klimash S., Klimash V. Principles for construction the compensators of reactive power with voltage stabilization for transformer substations // IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE 19. Сер. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017". - Khabarovsk: Institute of Physics Publishing, 2017. С. 012043.
- 3.Булатов О.А. Анализ измерений качества электроэнергии после установки бустерного трансформатора // Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2017.С. 86–90.
- 4.Воробьева Д.Ю., Глушкова А.И., Долгопол Т.Л. Повышение энергоэффективности систем электроснабжения сельских потребителей // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2016. №6. С. 38–40.
- 5.Галиев А.Р., Николаева О.Л., Сидоров А.Е. Оптимизация распределительных сетей электрической энергии при модернизации существующих // СОВРЕМЕННАЯ НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции / под общей редакцией А.И. Вострецова. Нефтекамск: Научно-издательский центр "Мир науки", 2017. С. 66–69.

6. Герасименко О.А., Панков С.Е. Экономические проблемы энергосбережения и повышения качества услуг по передаче электрической энергии // Экономика и предпринимательство. 2016. №12-3. С. 1171–1175.

7. Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : Материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 328–331.

8. Жилин М.И., Воркунов О.В. Повышение качества электрической энергии // Приоритетные направления развития науки : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Научное партнерство "Апекс", 2017. С. 83–85.

9. Журавлев Д.М., Балашов О.В., Мураховец В.М. Анализ технических решений для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии у потребителей в электрической сети 0,4 кВ // Энергетик. 2013. №9. С. 16–19.

10. Укьясов С.В., Рудых А.В. Способы повышения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы VIII международной научно-практической конференции. Саратов: ООО «ЦеСАин», 2017. С. 242–247.

11. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Абдрахманов Р.С. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4–10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. №9-10. С. 40–45.

Авторы публикации

Фетисов Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Роженцова Наталья Владимировна – канд. техн. наук, заведующая кафедрой «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Булатов Олег Александрович – магистр Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Lypkivskyi K.O. Mozharovskyi A.G., Increasing the efficiency of using booster transformers with segmented winding composed of AC voltage stabilizer//Praci Інституту електродинаміки академії Наук Nacionalnoi Ukraini. 2016. No. 45. P. 86–92.
2. Vlasayevsky S., Klimash S., Klimash V. Principles for construction the compensators of reactive power with voltage stabilization for transformer substations//IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE 19. CEP. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017". Khabarovsk: Institute of Physics Publishing, 2017. P. 012043.
3. Bulatov O.A. Analysis of power quality measurements after installation buster transformer//Materials of the international scientifically - practical Conference "Achievements, problems and prospects of development of the oil and gas industry. Milano: Almet'yevsk State oil Institute, 2017. P. 86–90.
4. Vorobyov D.Y., Glushkov A.I., Dolgopol T.L. Energy efficiency of power supply systems of rural consumers//automation and IT in the energy sector. 2016. No. 6. P. 38–40.
5. Galiev A.R., Nikolavea O.L., Sidorov A.E. Optimization of electricity distribution networks in the modernization of the existing//MODERN SCIENCE: CURRENT ISSUES and prospects of development of Materials International (part-time) scientific-practical the Conference. Under the general editorship of A.I. Vostretsova. Nefteka'msk: Scientific publishing center "Science World", 2017. P. 66–69.

6. Gerasimenko, O.A., Punks S.E. Economic problems of saving energy and improving the quality of services for the transfer of electrical energy//Economics and entrepreneurship. 2016. No. 12-3. P. 1171–1175.
7. Dulepov D.E., Kondranenkova I.E. Reducing losses and improving the quality of electric energy in asymmetric modes in rural distribution electric networks//Power through the EYES of YOUTH-2017 : Materials VIII International Scientific and technical conference. Samara: Samara State Technical University, 2017. P. 328–331.
8. Zhilin M.I., Vorkunov O.V. Electric energy quality improvement // Priority directions of development of science collection of articles based on the materials of the international scientifically - practical Conference. In 2 parts. -Moscow: Limited liability company "Scientific partnership" Apex ", 2017. P. 83–85.
9. Zhuravlev D.M., Balashov O.V., Murahovec V.M. Analysis of technical solutions to ensure the required quality of electricity consumers in the 0.4 kV electric network//Energy. 2013. No. 9. P. 16–19.
10. Ukjasov S.V., Rudyh A.V. Methods for improving the quality of electric energy in distributive networks of 0.38 kV//ACTUAL PROBLEMS of ENERGY of AIC : materials VIII international scientific-practical Conference. Saratov: Ltd. "CeSAin", 2017. P. 242–247.
11. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Abdrakhmanov R.S. Providing normative level voltage 0.4 -10 kV distributive networks using voltodobavochnyh transformer//PROCEEDINGS of HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS. ENERGY PROBLEMS. 2011. No. 9-10. P. 40–45.

Authors of the publication

Leonid V. Fetisov – PhD in Engineering sciences, Associate Professor Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Natalia V. Rozhencova – PhD in Engineering sciences, Head the Department Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Oleg A. Bulatov – Master Kazan state power engineering university, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

04 сентября 2018 г.



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ С РАЗЛОЖЕНИЕМ СМОЛИСТЫХ ПРОДУКТОВ НА ЧАСТИЦАХ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

И.Г. Донской

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Резюме: Работа посвящена численному исследованию процесса обращенной слоевой газификации древесной биомассы. Такие процессы используются для получения горючих газов на установках малой мощности. Для повышения качества генераторного газа предлагается использовать смесь древесного топлива с негорючим материалом, который может проявлять каталитическую активность при разложении нежелательных смолистых продуктов. Добавление негорючего материала снижает теплотворную способность смеси, однако способствует более глубокой очистке газа. Целью исследования является выбор оптимального соотношения «активный материал/древесное топливо» и определение минимальной активности материала, при которой его добавление к топливу становится эффективным.

Ключевые слова: газификация, катализ, древесина, смола, очистка, математическое моделирование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.

Для цитирования: Донской И.Г. Математическое моделирование газификации древесины с разложением смолистых продуктов на частицах активных компонентов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 107-117. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.

MATHEMATICAL MODELLING OF WOOD GASIFICATION WITH TARRY PRODUCTS DECOMPOSITION ON ACTIVE MATERIAL PARTICLES

I.G. Donskoy

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>, donskoy.chem@mail.ru

Abstract: The work is devoted to the numerical study of the process of downdraft fixed-bed gasification of woody biomass. Such processes are used to produce combustible gases at low-capacity power plants. To improve the quality of the produced gas, it is proposed to use a mixture of wood fuel with a non-combustible material that can exhibit catalytic activity in the decomposition of undesired tarry products. Adding a non-combustible material leads to lower heat value of fuel mixture, but contributes to a deeper gas purification. The aim of the study is to

select the optimal "active material / wood fuel" ratio and to determine the minimum material activity at which its addition to the fuel becomes effective.

Keywords: *gasification, catalysis, wood, tar, gas cleaning, mathematical modeling.*

Acknowledgments: *This work is performed in the course of scientific project III.17.1 of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences fundamental researches program, registration number AAAA-A17-117030310448-0.*

For citation: *I.G. Donskoy. Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 107-117. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.*

Введение

Газификация твердых топлив позволяет получать горючий газ для энергетики и химической технологии. Топливная база газификации – это не только горючие ископаемые (угли и тяжелые углеводороды), но и возобновляемые ресурсы, в первую очередь биомасса и отходы [1].

Одной из основных проблем низкотемпературной газификации является образование смолистых продуктов, которые, кроме снижения химического КПД процесса газификации [2], способствуют также спеканию частиц и загрязнению газового тракта. Способы снижения содержания смолы в генераторном газе можно разделить по стадиям, на которой происходит воздействие: перед реакционной зоной газогенератора (получение полукокса, торрефикация [3]); в реакционной зоне (использование ступенчатого дутья [4, 5], катализаторов [6], сорбентов [7, 8], обогащение дутья кислородом [9]), после реакционной зоны (фильтрационная и сорбционная очистка, каталитическая очистка [10–13], термическая обработка газа [14, 15]). Эти способы имеют как преимущества, так и недостатки. Выбор способа смолоочистки зависит от конкретных условий: сырья, аппарата, режима работы, требований к газу [16].

Для снижения выхода смолы при газификации в кипящем слое часто используют активные добавки к материалу слоя: это могут быть как природные материалы (например, доломит или известняк [17, 18], гематит [19]), так и синтезированные каталитические системы (обычно нанесенные соли никеля и железа [20, 21]). Однако при газификации в кипящем слое наличие ожиженного инертного материала является одним из необходимых условий работы аппарата. Материал слоя позволяет сохранять термическую однородность и устойчивость слоя. При газификации в плотном слое добавление инертного материала снижает удельную теплотворную способность (в расчете на единицу массы смеси), поэтому в общем случае термическая устойчивость процесса ухудшается. С другой стороны, инертный материал выступает в роли жесткого каркаса слоя, обеспечивая необходимую проницаемость и не позволяя ему оседать. В процессах фильтрационного горения инертный материал – это аккумулятор теплоты, позволяющий подогревать дутье перед реакционной зоной [22]. Наконец, каталитическая активность материала способствует конверсии продуктов пиролиза и повышает теплотворную способность генераторного газа [23].

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуется процесс обращенной газификации древесной биомассы с добавлением инертного и активного (способствующего разложению смол) материалов.

Математическая модель обращенного процесса газификации древесины

Рассматривается стационарный процесс газификации древесной биомассы в

плотном слое. Свойства древесины приведены в табл. 1. Активный материал смешивается с топливом до поступления в реактор. Начальный размер частиц древесины и негорючего материала равен 1 см. Уравнения, описывающие стационарный теплообмен в слое, могут быть записаны следующим образом [24–26]:

$$\lambda_f \frac{d^2 T^f}{dz^2} - (C_p^f J^f + C_p^s J^s) \frac{dT^f}{dz} + \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) + Q^f(z) = 0,$$

$$\lambda^g \frac{d^2 T^g}{dz^2} - C_p^g J^g \frac{dT^g}{dz} - \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) - \alpha_2 S_2 (T^g - T^w) + Q^g(z) = 0.$$

Здесь T – температура, К; C_p – теплоемкость, Дж/кг/К, λ – эффективная теплопроводность, Вт/м/К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²/К; J – массовый поток, кг/с; S_1 – площадь теплообмена между газом и топливом, м²; S_2 – площадь теплообмена между газом и стенкой, м²; Q – источник теплоты, Вт; z – пространственная координата (высота слоя), м; индексы f , s , g и w соответствуют топливу, инертному материалу газу и стенке. Теплоемкость потока твердой фазы равна сумме теплоемкостей топлива и инертного материала, температура частиц топлива и частиц материала слоя считаются равными. Коэффициенты переноса рассчитываются по средневзвешенным теплофизическим параметрам смеси. Инертный материал по своим свойствам эквивалентен зольному остатку.

Таблица 1

Свойства древесного топлива (% масс.)

W^f , %	10
A^d , %	0,45
V^{daf} , %	84,5
C^{daf} , %	49,1
H^{daf} , %	6,2
O^{daf} , %	44,65
N^{daf} , %	0,05

Эти уравнения вместе с соответствующими граничными условиями (постоянные расходы газа и топлива на входе в слой) определяют распределение температуры в реакторе. Для их решения необходимо знать также функции источников теплоты $Q(z)$. Эти функции определяются кинетикой химических реакций. В настоящей работе применяется упрощенный кинетико-термодинамический подход для их расчета: учитывается кинетика гетерофазных реакций, а реакции в газовой фазе считаются равновесными [25].

При численном решении задачи реактор разбивается по оси на ряд элементов малого объема. Зная время пребывания газа в каждом из этих элементов, можно записать для выбранного i -го элемента функцию источника теплоты:

$$Q_i(z) = \frac{-\Delta H_i^r}{\tau_i} = \frac{\left(\sum h_j n_j^{in} - \sum h_j n_j^{out} \right)}{\tau_i}.$$

Здесь ΔH^r – изменение энтальпии в результате химических реакций, Дж; h_j – мольная энтальпия j -го компонент, Дж/моль; n_j – количество j -го компонента, моль; τ – время контакта, с; индекс in относится к входящему потоку, out – к выходящему.

Таким образом, для вычисления функции источника (или стока) теплоты необходимо знать изменение компонентного состава системы в малом объеме. Расчет изменения химического состава происходит в две стадии. Сначала рассматриваются гетерогенные процессы: сушка, пиролиз и реакции углеродистого остатка с O_2 , CO_2 и H_2O :

$$\frac{dn_{H_2O}}{dt} = \beta S_1 \left(C_{H_2O}^{eq} - \frac{n_{H_2O}}{V_g} \right),$$

$$\frac{dn_V}{dt} = -k_{pyr} n_V,$$

$$\frac{dn_C}{dt} = -k_{O_2}^{eff} S_1 \frac{n_{O_2}}{V_g} - k_{CO_2}^{eff} S_1 \frac{n_{CO_2}}{V_g} - k_{H_2O}^{eff} S_1 \frac{n_{H_2O}}{V_g}.$$

Здесь V_g – порозный объем, м³; β – коэффициент массообмена, м/с; C^{eq} – равновесная концентрация паров воды, моль/м³; k_{pyr} – константа скорости пиролиза, с⁻¹; n_V – количество летучих веществ в топливе, моль; n_C – количество углерода топлива, моль; n_{O_2} , n_{CO_2} , n_{H_2O} , – количество молей соответствующих веществ в порозном объеме, моль; S_1 – площадь реакционной поверхности топлива, м²; k_{eff} – эффективная константа скорости гетерогенной реакции, м/с (нижний индекс относится к газифицирующему агенту). Эффективная константа скорости гетерогенной реакции k_{eff} определяется в квазистационарном приближении:

$$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)}}.$$

Здесь k_0 – предэкспонент, м/с; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль/К. Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций

Реакция	Предэкспонент	Энергия активации
Пиролиз древесины	$5,4 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$	96 кДж/моль
$C + O_2$	$2,4 \times 10^5 \text{ м/с}$	142
$C + CO_2$	$1,32 \times 10^6 \text{ м/с}$	259
$C + H_2O$	$9,3 \times 10^5$	175
Термическое разложение смолы	10^5 с^{-1}	150
Каталитическое разложение смолы	$0 \div 10^5 \text{ м/с}$	90

Предполагается, что частицы активного компонента равномерно распределены в слое топлива. Разложение смолистых продуктов протекает на поверхности этих частиц, поэтому скорость разложения пропорциональна концентрации смолы в газе, площади поверхности и эффективному кинетическому коэффициенту с аррениусовской зависимостью от температуры:

$$\frac{dn_T}{dt} = -k_T^a \frac{n_T}{V_g} - k_T^b S_c \frac{n_T}{V_g}.$$

Здесь n_T – количество смол, моль; S_c – площадь поверхности активного материала, м². Первое слагаемое соответствует некаталитическому (термическому) разложению смолы, второе – разложению смол при контакте с поверхностью активного материала.

В расчетах принят кинетический коэффициент в аррениусовской форме, где эффективная энергия активации E равна 90 кДж/моль, а предэкспонент k_A [м³/(м² с)]=м/с] выступает в роли варьируемого параметра. Поскольку этот параметр определяется состоянием поверхности, пористой структурой и химической природой материала, его величина может существенно меняться в зависимости от условий процесса. Физический

смысл этого коэффициента – условная активность материала слоя, и в расчетах его величина варьируется. В качестве материала поверхности могут быть использованы синтетические каталитические системы (с высокой активностью, но требующие высоких затрат на получение и выделение из продуктов газификации, такие как соединения никеля [27, 28], церия [29], циркония [30]) или, что более вероятно, природные минералы (дешевые, но обладающие меньшей активностью; среди них можно выделить доломит [31, 32], оливин [33], кальцит [34]). Предполагается, что материал слоя влияет только на кинетику разложения смолы и не влияет на процессы пиролиза и газификации топлива.

Результаты расчетов

С одной стороны, добавление негорючих материалов в слой уменьшает температуру горения топлива и увеличивает расходы на топливоподготовку и удаление золы. С другой стороны, разложение смол до простых горючих газов повышает калорийность газа и удешевляет систему его очистки перед сжиганием. Поэтому необходимо оценить оптимальную долю активного компонента. Эта доля будет зависеть от множества факторов, среди которых в первую очередь можно выделить активность гетерогенного разложения смолы. На рисунке показаны результаты расчетов для смесей древесины и активных компонентов с разным соотношением расходов и разной каталитической активностью.

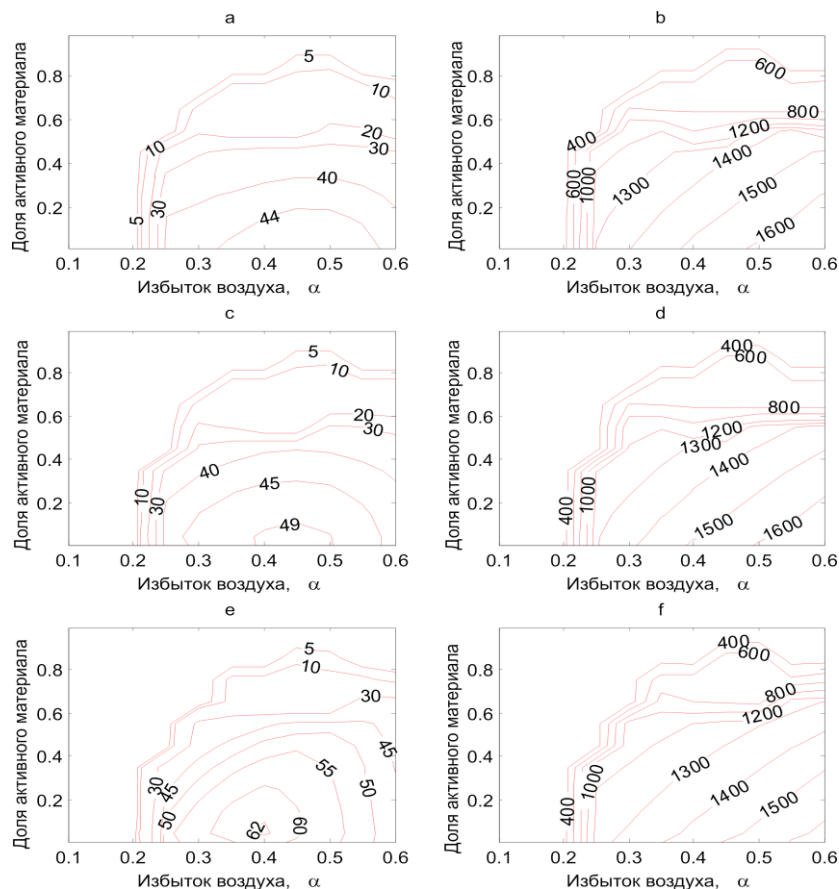


Рис. Зависимость химического КПД процесса газификации (%) и максимальной температуры процесса газификации (в градусах Кельвина) от коэффициента избытка воздуха (ось абсцисс) и доли негорючего компонента (ось ординат). Условная активность гетерогенного разложения смолы: *a, b* – 0 (инертный материал); *c, d* – 10^4 ; *e, f* – 10^5

Химический КПД процесса газификации определяется как отношение теплотворной способности газа к теплотворной способности твердого топлива, из которого он был получен [35]. Для инертного материала с нулевой активностью (рис., *a*) эффективность ожидаемо уменьшается с ростом доли негорючего компонента. При доле негорючего компонента около 30–40% процесс газификации практически затухает, протекая в режиме с очень низкой интенсивностью и с низким химическим КПД. Повышение активности негорючего компонента приводит к росту эффективности и смещению оптимальной точки в сторону увеличения массовой доли активного материала (рис., *c* и *e*). Так, при условной активности негорючего материала, равной 10^5 , удастся достичь химического КПД, равного 62%, при доле инертного материала порядка 5–10%.

Расчеты показывают, что при увеличении активности материала слоя границы термической устойчивости сдвигаются незначительно: скорость разложения смолы все так же чувствительна к температуре слоя.

В достаточно широком диапазоне активностей негорючий материал практически не сказывается на эффективности процесса: для получения значимого эффекта необходима условная активность порядка 10^4 , ниже этого значения влияние добавок негорючего материала сводится к снижению удельной теплотворной способности смеси и мало отличается от добавок материала с нулевой активностью.

Добавление активного материала ставит вопрос об его извлечении: оно может происходить путем выдувания или отсеивания зольного остатка. Для этого, однако, необходимо поддерживать оптимальный температурный уровень в ядре горения: при превышении температуры плавления золы слой может агломерироваться, что создает дополнительные проблемы при эксплуатации. Поэтому область эффективных режимов будет ограничиваться необходимостью соблюдения подходящих температурных условий. Как видно из рисунка, при коэффициенте избытка окислителя более 0,3–0,4 температура слоя может превышать характерные температуры деформации и плавления золы [36]. Поэтому в некоторых случаях возможно увеличение доли негорючего материала в слое для снижения опасности спекания при шлаковании.

Выводы

В работе проведено расчетное исследование эффективности разложения смолы при газификации древесины путем добавления в слой каталитически активного негорючего материала. Результаты математического моделирования показывают существование максимума химического КПД газификации при доле активного материала около 5–10% масс. Для этого, однако, необходима достаточно высокая каталитическая активность материала. Возможные проблемы извлечения активного материала из коксозольного остатка газификации могут возникать, в том числе, из-за превышения в процессе газификации температуры плавления золы, поэтому выбор термического режима требует коррекции с учетом свойств минеральной части конкретного топлива.

Литература

1. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review / S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 72. P. 363–384. (DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.038).
2. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production / L. Wang, C.L. Weller, D.D. Jones, M.A. Hanna // *Biomass and Bioenergy*. 2008. V. 32. P. 573–581. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.12.007).
3. Development of an ultra-small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot-scale updraft fixed bed gasifier / L. Ding, K. Yoshikawa, M. Fukuhara, Y. Kowata, S. Nakamura, D. Xin, L. Muhan // *Fuel*. 2018. V. 220. P. 210–219. (DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.080).
4. Biomass gasification on a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating

conditions on gas quality / A.L. Galindo, E.S. Lora, R.V. Andrade, S.Y. Giraldo, R.L. Jaen, V.M. Cobas // *Biomass and Bioenergy*. 2014. V. 61. P. 236–244. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.12.017).

5. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. V. 46. P. 72–95. (DOI: 10.1016/j.pecs.2014.06.002).

6. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).

7. Mun T.-Y., Seon P.-G., Kim J.-S. Production of a producer gas from woody waste via air gasification using activated carbon and a two-stage gasifier and characterization of tar // *Fuel*. 2010. V. 89. P. 3226–3234. (DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.042).

8. Zhang Y., Zheng Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations // *Fuel*. 2016. V. 183. P. 132–138. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.066).

9. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents / C.A.V.B. de Sales, D.M.Y. Maya, E.E.S. Lora, R.L. Jaen, A.M.M. Reyes, A.M. Gonzalez, R.V. Andrade // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 145. P. 314–323. (DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.101).

10. A review of biomass gasification syngas cleanup / N. Abdoulmoumine, S. Adhikari, A. Kulkarni, S. Chattanathan // *Applied Energy*. 2015. V.155. P. 294–307. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.095).

11. Woolcock P.J., Brown R.C. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas // *Biomass and Bioenergy*. 2013. V. 52. P. 54–84. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.02.036).

12. Reforming solutions for biomass-derived gasification gas – Experimental results and concept assessment / N. Kaisalo, J. Kihlman, I. Hannula, P. Simell // *Fuel*. 2015. V. 147. P. 208–220. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.056).

13. Zhang R., Brown R.C., Suby A. Thermochemical Generation of Hydrogen from Switchgrass // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. No. 1. P. 251–256. (DOI: 10.1021/ef034024d).

14. Ran J., Li C. High temperature gasification of woody biomass using regenerative gasifier // *Fuel Processing Technology*. 2012. V. 99. P. 90–96. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.01.002).

15. Materazzi M. Clean energy from waste. Fundamental investigations on ashes and tar behaviour in a two-stage fluid bed-plasma process for waste gasification. Doctoral Thesis accepted by University College London, UK (Springer Theses). Springer, 2017. 254 p. (DOI: 10.1007/978-3-319-46870-9)

16. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).

17. Corella J., Toledo J.M., Padilla R. Olivine or Dolomite as In-Bed Additive in Biomass Gasification with Air in a Fluidized Bed: Which Is Better? // *Energy & Fuels*. 2004. V. 18 (3). P. 713–720. (DOI: 10.1021/ef0340918).

18. Effect of pressure on tar decomposition activity of different bed materials in biomass gasification conditions / S. Tuomi, N. Kaisalo, P. Simell, E. Kurkela // *Fuel*. 2015. V. 158. P. 293–305. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.051).

19. Catalytic gasification of woody biomass in an air-blown fluidized-bed reactor using Canadian limonite iron ore as the bed material / S. Hurley, C. Xu, F. Preto, Y. Shao, H. Li, J. Wang, G. Tourigny // *Fuel*. 2012. V. 91. P. 170–176. (DOI: 10.1016/j.fuel.2011.07.016).

20. Biomass gasification in a catalytic fluidized reactor with beds of different materials / F. Miccio, B. Piriou, G. Ruoppolo, R. Chirone // *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 154. P. 369–374. (DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.002).

21. H₂-rich syngas production by fluidized bed gasification of biomass and plastic fuel / G. Ruoppolo, P. Ammendola, R. Chirone, F. Miccio // *Waste Management*. 2012. V. 32. No. 4. P. 724–732. (DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.004).

22. Specific Features of Filtration Combustion of a Pyrolyzed Solid Fuel / E.A. Salganskii, V.M. Kislov, S.V. Glazov, A.F. Zholudev, G.B. Manelis // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. V.

46. No. 5. P. 528–532. (DOI: 10.1007/s10573–010–0069–6).

23. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance / S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, X. Guo, M. He // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. P. 2191–2194. (DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.075).

24. Донской И.Г. Влияние смолообразования на эффективность процесса воздушной газификации биомассы // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2015. № 5–6. С. 93–100.

25. Coal gasification process simulations using combined kinetic–thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. No. 3. P. 529–559. (DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505).

26. Донской И.Г. Моделирование процесса совместной газификации древесины и полимерных материалов в плотном слое // *Химия твердого топлива*. 2018. № 2. С. 67–72.

27. Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal / M.-H. Cho, T.-Y. Mun, Y.-K. Choi, J.-S. Kim // *Energy*. 2014. V. 70. P. 128–134. (DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.097).

28. Steam reforming of phenol as biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalyst / M. Artetxe, M.A. Nahil, M. Olazar, P.T. Williams // *Fuel*. 2016. V. 184. P. 629–636. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.036).

29. Steam gasification of safflower seed cake and catalytic tar decomposition over ceria modified iron oxide catalysts / G. Duman, T. Watanabe, M.A. Uddin, J. Yanik // *Fuel Processing Technology*. 2014. V. 126. P. 276–283. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.04.035).

30. Acidic and basic surface sites of zirconia-based biomass gasification gas clean-up catalysts / T. Viinikainen, H. Ronkkonen, H. Bradshaw, H. Stephenson, S. Airaksinen, M. Reinkainen, P. Simell, O. Krause // *Applied Catalysis A: General*. 2009. V. 362. P. 169–177. (DOI: 10.1016/j.apcata.2009.04.037).

31. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).

32. Study on the combustion kinetic characteristics of biomass tar under catalysts / C. Li, Y. Yamamoto, M. Suzuki, D. Hirabayashi, K. Suzuki // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009. V. 95. No. 3. P. 991–997. (DOI: 10.1007/s10973-008-9126-8).

33. Olivine catalysts for methane- and tar-steam reforming / J.N. Kuhn, Z. Zhao, L.G. Felix, R.B. Slimane, C.W. Choi, U.S. Ozkan // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. V. 81. P. 14–26. (DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.11.040).

34. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).

35. Grabner M. Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal. – Wiley–VCH, 2015. 376 p.

36. Fang X., Jia L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass // *Bioresource Technology*. 2012. V. 104. P. 769–774. (DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.055).

Авторы публикации

Игорь Геннадьевич Донской – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории термодинамики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Иркутск, Россия. Email: donskey.chem@mail.ru.

References

1. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review / S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 72. P. 363–384. (DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.038).

2. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production / L. Wang, C.L. Weller, D.D. Jones, M.A. Hanna // *Biomass and Bioenergy*. 2008. V. 32. P. 573–581. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.12.007).
3. Development of an ultra-small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot-scale updraft fixed bed gasifier / L. Ding, K. Yoshikawa, M. Fukuhara, Y. Kowata, S. Nakamura, D. Xin, L. Muhan // *Fuel*. 2018. V. 220. P. 210–219. (DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.080).
4. Biomass gasification on a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality / A.L. Galindo, E.S. Lora, R.V. Andrade, S.Y. Giraldo, R.L. Jaen, V.M. Cobas // *Biomass and Bioenergy*. 2014. V. 61. P. 236–244. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.12.017).
5. Heidenreich S., Foscolo P.U. New concepts in biomass gasification // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. V. 46. P. 72–95. (DOI: 10.1016/j.pecs.2014.06.002).
6. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).
7. Mun T.-Y., Seon P.-G., Kim J.-S. Production of a producer gas from woody waste via air gasification using activated carbon and a two-stage gasifier and characterization of tar // *Fuel*. 2010. V. 89. P. 3226–3234. (DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.042).
8. Zhang Y., Zheng Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations // *Fuel*. 2016. V. 183. P. 132–138. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.06.066).
9. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents / C.A.V.B. de Sales, D.M.Y. Maya, E.E.S. Lora, R.L. Jaen, A.M.M. Reyes, A.M. Gonzalez, R.V. Andrade // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 145. P. 314–323. (DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.101).
10. A review of biomass gasification syngas cleanup / N. Abdoulmoumine, S. Adhikari, A. Kulkarni, S. Chattanathan // *Applied Energy*. 2015. V.155. P. 294–307. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.095).
11. Woolcock P.J., Brown R.C. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas // *Biomass and Bioenergy*. 2013. V. 52. P. 54–84. (DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.02.036).
12. Reforming solutions for biomass-derived gasification gas – Experimental results and concept assessment / N. Kaisalo, J. Kihlman, I. Hannula, P. Simell // *Fuel*. 2015. V. 147. P. 208–220. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.056).
13. Zhang R., Brown R.C., Suby A. Thermochemical Generation of Hydrogen from Switchgrass // *Energy Fuels*. 2004. V. 18. No. 1. P. 251–256. (DOI: 10.1021/ef034024d).
14. Ran J., Li C. High temperature gasification of woody biomass using regenerative gasifier // *Fuel Processing Technology*. 2012. V. 99. P. 90–96. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.01.002).
15. Materazzi M. Clean energy from waste. Fundamental investigations on ashes and tar behaviour in a two-stage fluid bed-plasma process for waste gasification. Doctoral Thesis accepted by University College London, UK (Springer Theses). Springer, 2017. 254 p. (DOI: 10.1007/978-3-319-46870-9)
16. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).
17. Corella J., Toledo J.M., Padilla R. Olivine or Dolomite as In-Bed Additive in Biomass Gasification with Air in a Fluidized Bed: Which Is Better? // *Energy & Fuels*. 2004. V. 18 (3). P. 713–720. (DOI: 10.1021/ef0340918).
18. Effect of pressure on tar decomposition activity of different bed materials in biomass gasification conditions / S. Tuomi, N. Kaisalo, P. Simell, E. Kurkela // *Fuel*. 2015. V. 158. P. 293–305. (DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.051).
19. Catalytic gasification of woody biomass in an air-blown fluidized-bed reactor using Canadian limonite iron ore as the bed material / S. Hurley, C. Xu, F. Preto, Y. Shao, H. Li, J. Wang, G. Tourigny // *Fuel*. 2012. V. 91. P. 170–176. (DOI: 10.1016/j.fuel.2011.07.016).

20. Biomass gasification in a catalytic fluidized reactor with beds of different materials / F. Miccio, B. Piriou, G. Ruoppolo, R. Chirone // *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 154. P. 369–374. (DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.002).
21. H₂-rich syngas production by fluidized bed gasification of biomass and plastic fuel / G. Ruoppolo, P. Ammendola, R. Chirone, F. Miccio // *Waste Management*. 2012. V. 32. No. 4. P. 724–732. (DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.004).
22. Specific Features of Filtration Combustion of a Pyrolyzed Solid Fuel / E.A. Salganskii, V.M. Kislov, S.V. Glazov, A.F. Zholudev, G.B. Manelis // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. V. 46. No. 5. P. 528–532. (DOI: 10.1007/s10573-010-0069-6).
23. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance / S. Luo, B. Xiao, Z. Hu, S. Liu, X. Guo, M. He // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. V. 34. P. 2191–2194. (DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.075).
24. Donskoy I.G. Tar formation influence on fixed bed air-blown biomass gasification process efficiency // *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems.* – 2015. – No. 5–6. – P. 93–100. [in Russian].
25. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. No. 3. P. 529–559. (DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505).
26. Donskoi I.G. Process simulation of the co-gasification of wood and polymeric materials in a fixed bed // *Solid Fuel Chemistry*. – 2018. – V. 52. – No. 2. – P. 121–127. (DOI: 10.3103/S0361521918020027)
27. Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal / M.-H. Cho, T.-Y. Mun, Y.-K. Choi, J.-S. Kim // *Energy*. 2014. V. 70. P. 128–134. (DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.097).
28. Steam reforming of phenol as biomass tar model compound over Ni/Al₂O₃ catalyst / M. Artetxe, M.A. Nahil, M. Olazar, P.T. Williams // *Fuel*. 2016. V. 184. P. 629–636. (DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.036).
29. Steam gasification of safflower seed cake and catalytic tar decomposition over ceria modified iron oxide catalysts / G. Duman, T. Watanabe, M.A. Uddin, J. Yanik // *Fuel Processing Technology*. 2014. V. 126. P. 276–283. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.04.035).
30. Acidic and basic surface sites of zirconia-based biomass gasification gas clean-up catalysts / T. Viinikainen, H. Ronkkonen, H. Bradshaw, H. Stephenson, S. Airaksinen, M. Reinkainen, P. Simell, O. Krause // *Applied Catalysis A: General*. 2009. V. 362. P. 169–177. (DOI: 10.1016/j.apcata.2009.04.037).
31. Han J., Kim H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. P. 397–416. (DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.015).
32. Study on the combustion kinetic characteristics of biomass tar under catalysts / C. Li, Y. Yamamoto, M. Suzuki, D. Hirabayashi, K. Suzuki // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2009. V. 95. No. 3. P. 991–997. (DOI: 10.1007/s10973-008-9126-8).
33. Olivine catalysts for methane- and tar-steam reforming / J.N. Kuhn, Z. Zhao, L.G. Felix, R.B. Slimane, C.W. Choi, U.S. Ozkan // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. V. 81. P. 14–26. (DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.11.040).
34. Reactive bed materials for improved biomass gasification in a circulating fluidized bed reactor / J. Pecho, T.J. Schidhauer, M. Sturzenegger, S. Biollaz, A. Wokaun // *Chemical Engineering Science*. 2008. V. 63. P. 2465–2476. (DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.001).
35. Grabner M. Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal. – Wiley–VCH, 2015. 376 p.
36. Fang X., Jia L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass // *Bioresource Technology*. 2012. V. 104. P. 769–774. (DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.055).

© И.Г.Донской

Authors of the publication

Igor G. Donskoy – PhD in Engineering sciences, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russia. Email: donskoy.chem@mail.ru.

Поступила в редакцию

07 декабря 2018 г.



**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЯДА
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

М. Ф. Садыков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Разработан комплексный метод и автоматизированная многофункциональная установка для исследования акустооптических, магнитоакустических и магнитооптических явлений в магнитных материалах, например: манганитах, магнетиках, ферроиках, высокотемпературных сверхпроводниках.

Ключевые слова: автоматизированная установка, комплексный метод, антиферромагнетик, магнитооптика, магнитоакустика.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-118-126.

Для цитирования: Садыков М.Ф. Комплексный метод и автоматизированная многофункциональная установка для исследования ряда физических свойств перспективных материалов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 118-126. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-118-126.

**COMPLEX METHOD AND AUTOMATED MULTIFUNCTIONAL INSTALLATION
FOR RESEARCH THE PHYSICAL PROPERTIES OF PERSPECTIVE MATERIALS**

M.F. Sadykov

Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan

Abstract. A complex method and an automated multifunctional installation have been developed for research acousto-optic, magnetoacoustic and magneto-optical phenomena in magnetic materials, for example, manganites, magnetic materials, ferroics, high-temperature superconductors.

Keywords: automated installation, complex method, antiferromagnetic, magneto optic, magnetoacoustic.

For citation: M.F. Sadykov. Complex method and automated multifunctional installation for research the physical properties of perspective materials. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 118-126. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-118-126.

Введение

На сегодняшний день в современных областях науки и техники благодаря большому объему информации эффективно используются автоматизированные установки и проводятся комплексные испытания образцов новых материалов и техники. К таким областям, в первую очередь, относятся: ядерная физика, физика твердого тела, радиофизика и электроника [1–3].

Для достижения высокого качества исследований необходима автоматизация контроля управления. Тем временем, автоматизация влияет на технологию процесса производства, на развитие более полной механизации, а также на усовершенствование оборудования [4].

Нами был разработан комплексный метод и создана автоматизированная многофункциональная установка (АМУ) для изучения магнитооптических, магнитоакустических, и акустооптических явлений в магнитных материалах, например: манганитах, магнетиках, ферроиках, высокотемпературных сверхпроводниках [5–6]. Разработанная и созданная АМУ на основе комплексного метода дает возможность одновременного экспериментального исследования магнитоупругих, акусто- и магнитооптических свойств магнитоупорядоченных материалов.

Разработка комплексного метода и АМУ

Учитывая физические особенности исследуемых материалов, разработанный комплексный метод предполагает наличие функциональных систем и блоков АМУ, показанных на рис.1.



Рис.1. Функциональная схема АМУ

После проведенного анализа в области методов и установок, созданных для комплексного исследования перспективных материалов электроники, нами была разработана полностью автоматизированная и многофункциональная экспериментальная установка с использованием современных измерительных и аппаратно-программных средств (рис. 2).

Комплексный метод состоит из следующих этапов:

1. Подготовка образцов и измерительной ячейки. На этом этапе производится обработка исследуемых кристаллов и определяются направления кристаллографических осей. Для возбуждения и приема ультразвука пьезопреобразователи присоединяются к граням кристалла на твердой склейке – поперечные акустические волны формируются и принимаются на заданных частотах и с известной поляризацией.

2. Предварительные эксперименты с целью оптимизации условий генерации и детектирования оптических и акустических пучков, приложения и других измерений магнитного поля. Проводимые на данном этапе работы позволяют соотнести известные

теоретические и экспериментальные результаты для исследуемого образца, позволяя скорректировать условия и геометрию проведения эксперимента в последующих исследованиях.

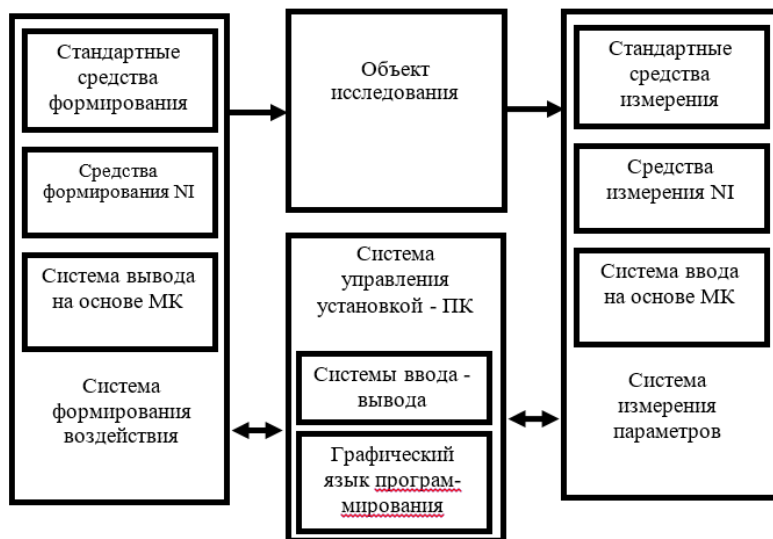


Рис. 2. Автоматизированная установка

Структурная блок-схема разработанной и созданной установки показана рис. 3 [7, 8].

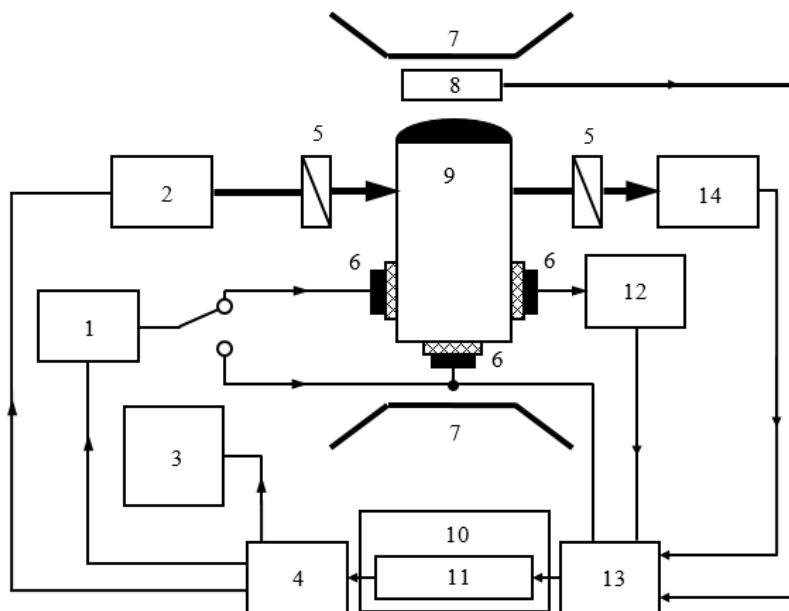


Рис. 3. Общая структура АМУ:

1 – ВЧ усилитель мощности; 2 – источник ИК-излучения; 3 – регулируемый источник питания магнита; 4 – цифро-аналоговый преобразователь; 5 – поляризаторы; 6 – источник и приемник акустических волн; 7 – полюса электромагнита; 8 – датчик магнитного поля; 9 – исследуемый материал; 10 – персональный компьютер; 11 – программный комплекс; 12 – супергетеродинный широкополосный приемник; 13 – аналого-цифровой преобразователь; 14 – приемник ИК-излучения

Использование аппаратных и программных средств компании *National Instruments* позволило реализовать управляющую часть АМУ по изучению магнитных, магнитоупругих, акустических, акустооптических и электрических свойств магнетиков, полупроводниковых и диэлектрических материалов. Установка с применением комплексного метода позволяет проводить исследования перечисленных свойств и особенностей, и в частности, дифракции света на акустической волне в условиях приложенного внешнего магнитного поля до $1,67 \cdot 10^6$ А/м.

С целью исследования упругих и магнитоупругих свойств образцов в АМУ имеется акустическая часть установки (рис. 4) [7, 9].

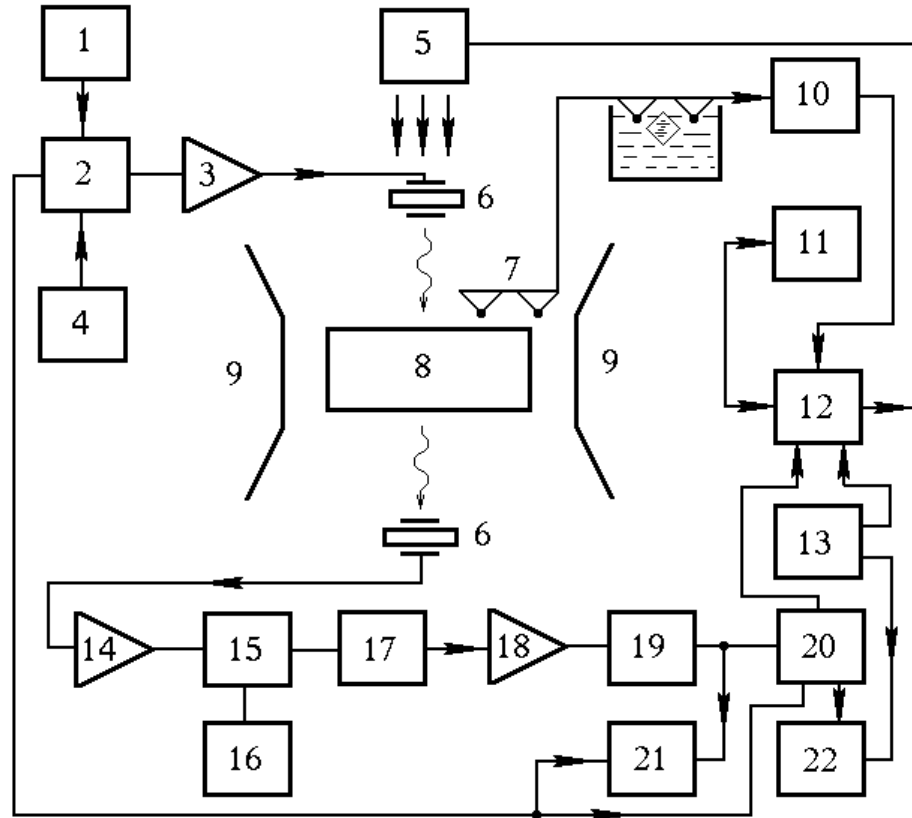


Рис.4. Акустическая часть АМУ:

1 – тактирующий генератор; 2 – модулятор; 3 – широкополосный усилитель; 4 – генератор несущей частоты; 5 – блок термостабилизации (азотная продувка); 6 – пьезопреобразователи LiNbO_3 X среза; 7 – термостолбик (последовательно соединенные термопары); 8 – исследуемый материал; 9 – полюса магнита; 10 – микровольтметры (В7–38); 11 – персональный компьютер; 12 – блок сопряжения; 13 – регулируемый источник питания магнита; 14 – регулируемый ВЧ усилитель; 15 – смеситель; 16 – гетеродин; 17 – ФНЧ; 18 – резонансный усилитель; 19 – детектор; 20 – стробоскопический вольтметр (В9–5); 21 – осциллограф; 22 – регистратор

Оптическая часть АМУ позволяет проводить исследования оптических и акустооптических свойств изучаемых материалов (рис. 3). Для проведения оптических экспериментов используется полупроводниковый лазер ИЛПН-1300-50М с длиной волны 1,35 мкм и мощностью 50 мВт. Регистрация прохождения через образец инфракрасного излучения производится с помощью оптического датчика (поз. 14 рис. 3).

Чувствительность АМУ при магнитоакустических измерениях равна 5 мкВ, а при акустооптических – 2 нВт. Температурная стабилизация установки позволяет поддерживать температуру исследуемых образцов в диапазоне температур от плюс 150 до минус 150°С с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Программный комплекс

Сбор, накопление, предварительная обработка и визуализация результатов исследований производится с помощью программного комплекса АМУ. Для этих целей были разработаны собственные алгоритмы обработки информации.

Программное обеспечение (ПО) после каждого проведенного исследования собирает результаты в массив данных и сохраняет их. Для того, чтобы проводить дальнейшую обработку, создана программа анализа и визуализации результатов исследований в виде трехмерной картины.

Лицевая панель ПО показана на рис. 5, 6. Полученные данные наблюдаются экспериментатором в режиме реального времени. Например, лицевая панель программного комплекса позволяет визуализировать графики измеряемых зависимостей [5].

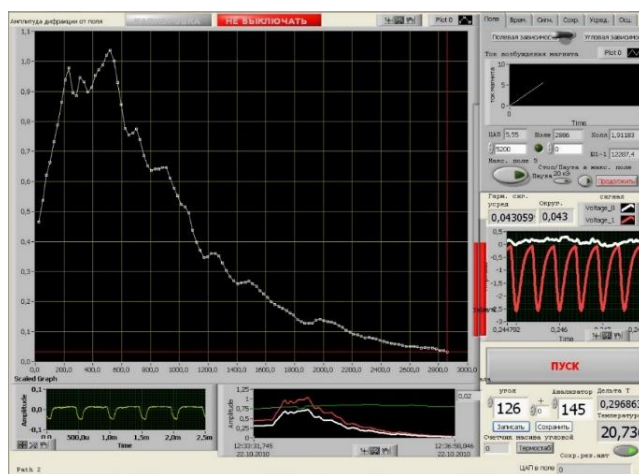


Рис. 5. Лицевая панель ПО в режиме полевой зависимости

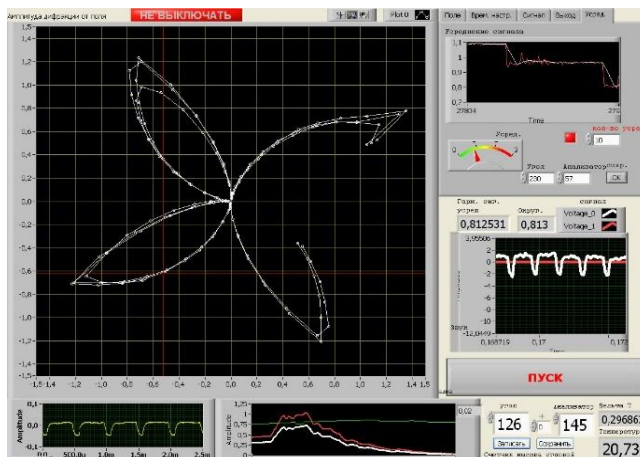


Рис.6. Лицевая панель ПО в режиме измерения угловых зависимостей

В АМУ реализовано 3 режима измерений:

1. Режимы полевых и температурных зависимостей. В этих режимах проводятся эксперименты с линейно уменьшающимися или увеличивающимися значениями магнитного поля или температуры.
2. Режим пространственных изменений каких-либо характеристик. В этом режиме производится сканирование по поверхности – эксперимент при фиксированных значениях различных внешних параметров.
3. Режим внешних воздействий.

Проведение исследований

Разработанный комплексный метод и АМУ позволили выполнять исследования магнитоакустических и магнито-акустооптических взаимодействий в антиферромагнетиках и проводить экспериментальное изучение эффектов, таких как: антиферромагнитная коническая рефракция, магнитоакустическое двулучепреломление, акустооптическая дифракция, фотопроводимость и другие фотостимулированные проявления явлений в сегнетоэлектриках, а также необычные диэлектрические и магнитные свойства манганитов.

На созданной АМУ проведены циклы экспериментальных исследований с использованием разработанных методик, в ходе которых были получены оригинальные результаты [10–19]:

- обнаруженная угловая зависимость эффекта двулучепреломления поперечной акустической волны в легкоплоскостном антиферромагнетике определяется распределением в плоскости базиса довольно слабых магнитных полей, что демонстрирует высокую чувствительность ультразвуковых методов и возможность их использования для изучения не только упругих и магнитоупругих, но и чисто магнитных свойств сильных магнетиков [10–14];
- обнаруженный экспериментально эффект модуляции оптических мод при определенных условиях может являться основой для оптических модуляторов с дополнительной степенью свободы и большим коэффициентом управления [15];
- в легкоплоскостном антиферромагнетике $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ обнаружено резкое изменение оптического двулучепреломления в интервале магнитного поля 237 – 553 кА/м [16,17];
- впервые обнаружено в гематите разделение входящего потока акустической энергии на два потока, соответствующих двум нормальным модам поперечных колебаний [18];
- в монокристаллах LSMO-0.1 и LSMO-0.11 наблюдалась гигантская диэлектрическая проницаемость при температурах ниже 350 К для $x = 0.1$ и ниже 310 К для $x = 0.11$. Особенности этих свойств можно объяснить появлением динамических неоднородностей на наномасштабе в предперкаляционном режиме зарядового и фазового разделения. Внешнее магнитное поле сильно влияет на зарядовое и фазовое разделение, что приводит к колоссальному магнетоемкостному эффекту [19].

Выводы

Разработана и создана АМУ, реализующая комплексный метод, объединяющий несколько наиболее распространённых методов изучения магнито- и электроупорядоченных материалов в едином комплексном методе. Установка позволяет регистрировать акустооптические и магнитоакустические эффекты и проводить исследования магнитооптических, акустооптических, магнитоакустических свойств магнитных материалов, фотоэлектрические эффекты в сегнетоэлектриках, индуцированные фазовые переходы в кристаллах. На АМУ были проведены исследования различных эффектов и взаимодействий в антиферромагнетиках, манганитах и релаксорах, в ходе которых были получены оригинальные результаты.

Литература

1. Козырев Ю.Г. Гибкие производственные системы. Справочник [Текст] : справочное издание. Москва : КНОРУС, 2017. 364 с.
2. Ларионов А.С. Система автоматизированной обработки информации для контроля производственных процессов // Молодежный научно-технический вестник. 2015. №4. С. 23.
3. Костюков В.Н. Автоматизированные системы контроля качества и диагностики / В.Н. Костюков, А.П. Наumenко. Омск: ОмГТУ, 2007. 89 с.
4. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Изд-е 2-е, испр. М.: «Техносфера», 2007. С.248.
5. Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Шакирзянов М.М. Экспериментальная установка для исследования акустооптических процессов в магнитных материалах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. №5-6. С. 71–77.
6. Migachev S.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A., Shakirzyanov M.M. An automated facility for studying acousto-optical phenomena in magnetic materials // Instruments and Experimental Techniques. – 2011. – V. 54. – №4. – P. 590–592.
7. Автоматизированная установка для исследования магнитного акустооптического взаимодействия в антиферромагнетиках: пат. 131227 Рос. Федерация: МПК G09B 23/18/ Садыков М.Ф., Мигачев С.А., Шакирзянов М.М., Иванов Д.А., Закиева Р.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "КГЭУ". – № 2013114625/28; заявл. 01.04.2013; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22 – 13 с.
8. Иванов, Д.А. Комплексный метод и автоматизированная сканирующая установка для исследования магнитоакустооптических взаимодействий: дисс. ... канд. техн. наук 05.11.13 [Текст]: Казань, 2012. — 116 с.
9. Садыков, М.Ф. Электрические, магнитооптические и магнитоакустические эффекты в магнитном полупроводнике α -Fe₂O₃. дисс. ... канд. физ.-мат. наук 01.04.10 [Текст]: Казань, 2002. — 106 с.
10. Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М. Поворот плоскости поляризации и линейное двупреломление звука в гематите ниже точки Морино // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 4. С. 663–666.
11. Akhmadullin I.Sh., Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Temperature Hysteresis and Anomalous Behavior of Sound velocity in Hematite near the Reorientation Phase Transition // The Physics of Metals and Metallography. 2005. Т. 100. № SUPPL. 1.
12. Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Magnetic Sound Birefringence in the Easy-Axis Antiferromagnet α -Fe₂O₃ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006. Т. 300. № 1. С. 462–464.
13. Ахмадуллин И.Ш., Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М. Магнитное двупреломление звука и магнитоакустические осцилляции в гематите // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 2. С. 305–307.
14. Ахмадуллин И.Ш., Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М. Проявление базисной анизотропии и механических граничных условий в магнитном двупреломлении звука в гематите // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 3. С. 506–508.
15. Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Шакирзянов М.М. Акустооптическая дифракция в гематите, обусловленная магнитоупругой модуляцией поляризации оптических мод // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. Вып. 1. С. 54–58.
16. Akhmadullin I.Sh., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A., Sadykov M.F. Investigation of the Cotton-Mouthon Effect in α -Fe₂O₃ Easy-Plane Antiferromagnet // The Physics of Metals and Metallography. 2002. Т. 93. № SUPPL. 1., p. 111–113.
17. Ахмадуллин И.Ш., Голенищев-Кутузов В.А., Мигачев С.А., Садыков М.Ф. Магнитное двулучепреломление света в гематите // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. № 2. С. 321–324.
18. С.А. Мигачев, М.Ф. Садыков, М.М. Шакирзянов. Антиферромагнитная коническая рефракция упругих волн в гематите // Письма в ЖЭТФ 91, вып. 7, 2010. С. 372–374.

19. Мамин Р.Ф., Игами Т., Мартон Ж., Мигачев С.А., Садыков М.Ф. Гигантская диэлектрическая восприимчивость и магнитоёмкостный эффект в манганитах при комнатной температуре // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 10. С. 731–735.

Автор публикации

Садыков Марат Фердинантович – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

References

1. Kuznetsov V.A. The instrument is modular, automated measurement system / V.A. Kuznetsov, V.N. The Stroitelev, E.Yu. Timofeev and other; ed. by V. Kuznetsov. M.: Radio and communication, 1993. 304 с.
2. Kisurin A., Bepalenko D. Automation of measurements and control of electrical and non-electrical quantities / Voronezh State Technical University» Voronezh, 2009.
3. Kostyukov V.N. Automated quality control and diagnostics systems / V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko. Omsk: Omsk State Technical University, 2007. 89 p.
4. Oppenheim A., Schafer R. Digital signal processing. Ed. 2, M.: «Technosphere», 2007. P.248.
5. Migachev S.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A., Shakirzyanov M.M. Experimental setup for the study of acousto-optical processes in magnetic materials // Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2010. №5-6. P. 71–77.
6. Migachev S.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A., Shakirzyanov M.M. An automated facility for studying acousto-optical phenomena in magnetic materials // Instruments and Experimental Techniques. 2011. V. 54, №4. P. 590–592.
7. Automated installation for investigation of magnetic acousto-optic interaction in antiferromagnets: pat. 131227, Russian Federation. Sadykov M.F., Migachev S.A., Shakirzyanov M.M., Ivanov D.A., Zakieva R.R. Kazan state power engineering university. № 2013114625/28; 01.04.2013; pub. 10.08.2013, 13 p.
8. Ivanov D.A. Integrated method and automated scanning installation for the study of magneto-acousto-optic interactions: Diss. ... cand. tech. sciences 05.11.13. Kazan, 2012. 116 p.
9. Sadykov M.F. Electrical, magneto-optical and magnetoacoustic effects in the α -Fe₂O₃ magnetic semiconductor. diss. ... cand. phys.-mat. sciences 01.04.10. Kazan, 2002. 116 p.
10. Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Polarization plane Rotation and linear birefringence of sound in hematite below the Morin point // Physics of the Solid State. 2006. V. 48, № 4. P. 663–666.
11. Akhmadullin I.Sh., Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Temperature Hysteresis and Anomalous Behavior of Sound velocity in Hematite near the Reorientation Phase Transition // The Physics of Metals and Metallography. 2005. T. 100. № SUPPL. 1.
12. Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Magnetic Sound Birefringence in the Easy-Axis Antiferromagnet α -Fe₂O₃ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006. T. 300. № 1.C. 462–464.
13. Akhmadullin I.Sh., Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Magnetic birefringence of sound and magnetoacoustic oscillations in hematite // Physics of the Solid State. 2004. T. 46. № 2. C. 305–307.
14. Akhmadullin I.S., Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Manifestation of the underlying anisotropy and mechanical boundary conditions in magnetic duraluminium in hematite // Physics of the Solid State. 2005. V. 47, № 3. P. 506–508.

15. Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Acousto-optic diffraction in hematite, due to the magnetoelastic modulation of the polarization of the optical mod // JETP Letters. 2008. V. 88, Iss. 1. P.54–58.

16. Akhmadullin I.Sh., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A., Sadykov M.F. Investigation of the Cotton-Mouthon Effect in α -Fe₂O₃ Easy-Plane Antiferromagnet // The Physics of Metals and Metallography. 2002. T. 93, № SUPPL. 1., p. 111–113.

17. Akhmadullin I.S., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A., Sadykov M.F. Magnetic birefringence of light in hematite // Physics of the Solid State. 2002. V. 44, № 2. P. 321–324.

18. Migachev S.A., Sadykov M.F., Shakirzyanov M.M. Antiferromagnetic conical refraction of elastic waves in hematite // JETP Letters, V. 91, Iss. 7, 2010. p. 372–374.

19. Mamin R.F., Egami T., Marton Z., Migachev C.A., Sadykov M.F. Giant dielectric susceptibility and magnetocapacitance effect in manganites at room temperature // JETP Letters. 2007. V. 86, № 10. P. 731–735.

Author of the publication

Marat F. Sadykov – PhD in Physico-mathematical sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical bases of electrical engineering» of Kazan State Power Engineering University (KSPEU). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

Поступила в редакцию

28 октября 2018 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.3.072

OPTIMAL OPERATION OF ELECTRICAL POWER GENERATORS FOR OIL WELLS OPERATED BY ARTIFICIAL LIFTING AT RUMILA FIELD

Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali¹, V.Yu. Kornilov², A.G. Gorodnov³

¹ Rumaila Operating Organization, Basra, Iraq

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

Abstract: Numerous oil wells within Rumaila field contain Electrical Submersible Pumps (ESPs). ESPs are utilised to maximise the oil production from existing wells by providing artificial lift where pressure is low, which helps maintain oil production levels. The number of ESPs installed throughout the Rumaila.

Field is growing consistently to sustain oil field production. Due to the remote locations for each of the ESPs the current strategy is to supply power to ESPs using individual diesel engine generators located at each remote ESP well site. This is an inefficient design, as individual diesel engines are resource intensive due to maintenance and frequent diesel filling. The generators are also a source of significant unreliability causing ESP shutdowns/trips resulting in extended downtime. Given the above a Pre-FEED has been carried out considering supplying ESPs using OHTL's supplying electrical power from EPP to ESPs in Area C. by uses parallel operation of diesel Generators , we could to constrict 124 from 184 and use 60 only ,by this we get high economic gain and technique, in additional that environmental protection by decreasing pollution.

Keywords: diesel generators, the Newton Raphson method, load factor, electrical submersible pumps correction power, Steiner trees.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-127-132.

For citation: Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali, V.Yu. Kornilov, A.G. Gorodnov. Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at rumila field. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 127-132. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-127-132.

Introduction

Iraq super-giant field

Rumaila is one of the world's greatest so-called super-giant oil fields – those that contain over a billion barrels of recoverable oil. It is estimated that some 17 billion barrels of recoverable oil are still contained within Rumaila's reservoirs.

Location and surface area

The field is located 50km to the west of the city of Basra, southern Iraq. The Basra region is home to all six of Iraq's ports, including the deep-water facility at Umm Qasr. Rumaila encompasses an area of 1,600 square kilometres, extending approximately 80km north to south

and 20km west to east, with the main anticline consisting of two domes, South Rumaila and North Rumaila.

Why use ESP?

As a result of reduction in the reservoir pressures in the depth of wells and to enhancement the productivity, petroleum companies used to apply ESP[1-5] technology which is represented by insertion special pumps operated by three phases induction motors its voltage is ranged from 1.5-3.5 KV and its horse power is ranged from 100-1000 HP its technologies are in compliance with the depth and temperature of the oil reservoirs in addition to other conditions pertaining fluids and Gases fig(1).

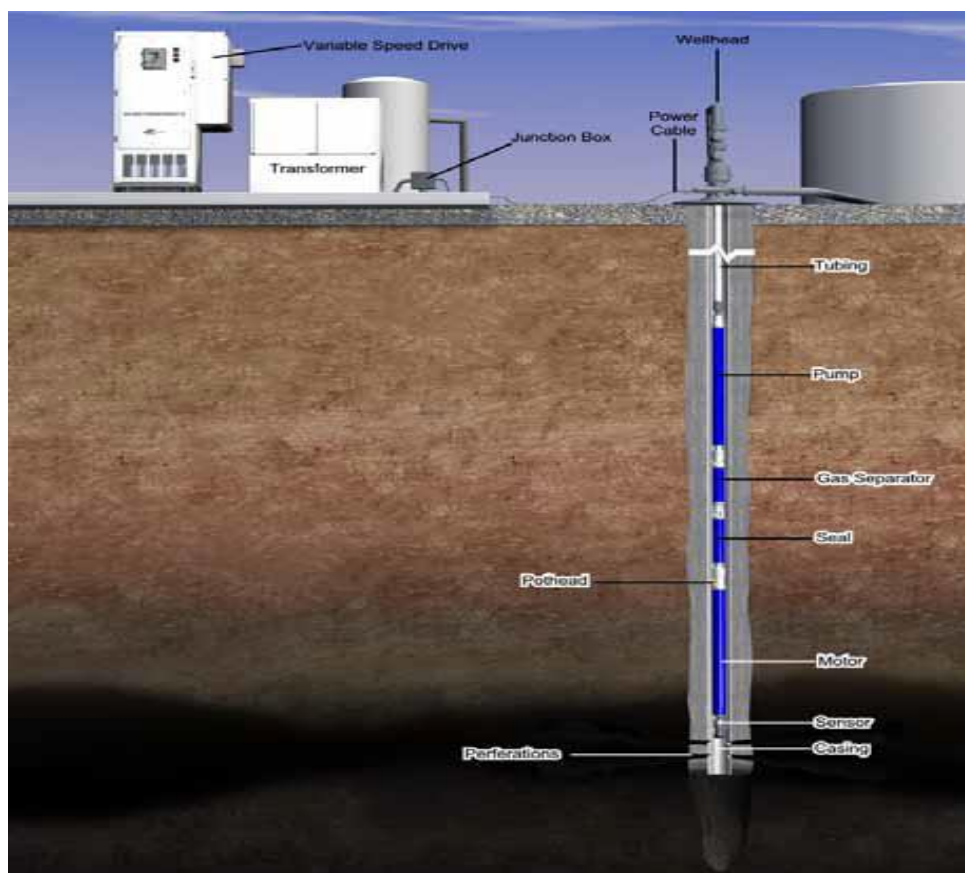


Fig 1. Electrical submersible pump components

Since Technical Service Contract was signed in 2009 between Basra oil company and BP, PetroChina and the State Oil Marketing Organization (SOMO) to establish the Rumaila Operating Organisation (ROO) to transform the oilfield into a sustainable world-class oilfield and to enhancement the productivity to the higher level within specific period applying ESP technology for operate the almost stopped wells and weaken wells so that the plan of 10 next years included operating more than 500 oil wells.

As a result of frequent electricity shutting down, the concerned companies put a plan to overcome (Instability in the main power grid) such these cases putting Diesel generators on each wells so that these companies contracted with international companies for supply, maintenance and operation. In spite of the validity of the treatment and its application using diesel generators, but there are technical and economical important mistakes resulted from using such these

generators on each oil wells operated by artificial lifting technology.

Research Issues

This research put to solve more than problem represented by:

Operation of single generator at one oil well .As the Amps and Voltages Daily for electrical submersible pumps operation to Rumaila field on March 2018 which supplied from 126 electrical diesel generator . we see :

Low load factor

There more of 60% for generators were worked at load factor less than 0.5. fig(2).

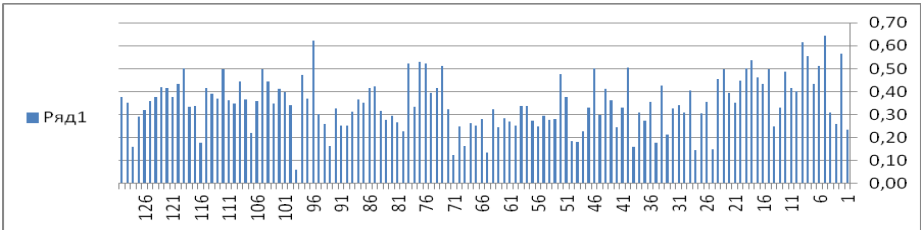


Fig. 2. Load factor to singular operation of diesel generators

Loss electrical power

The actual electric power to operate 184 oil wells were (27026 KVA) . While their production were (125120 KVA). That mean there excess power (98094 KVA).fig (3).

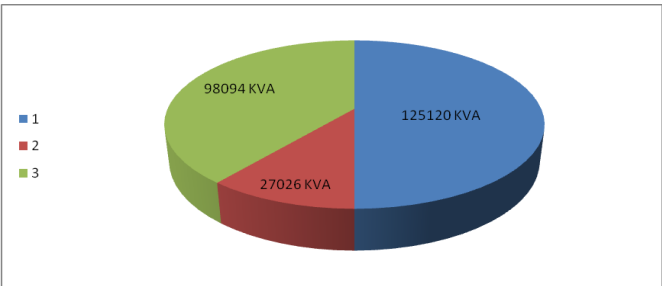


Fig. 3. The actual, real and excess electrical power KVA

High finance cost

The high finance cost that represented by operate this huge of diesel generators (fuel, operators, logistic support, spare part and maintenance)and pollution of environment.

Reduce the risk on operators and equipment for operate 60 GE in lieu of 180 GE

Aims

We aim to get optimal operation of diesel generators under ideal technique standards to get stable electric energy with the same existing equipment just we add synchronous equipment and overhead transmission lines install.

Objectives

When we complete this project we will to achieve reduce the financial cost for expenditure for Iraqi oil production cost. fig (4).

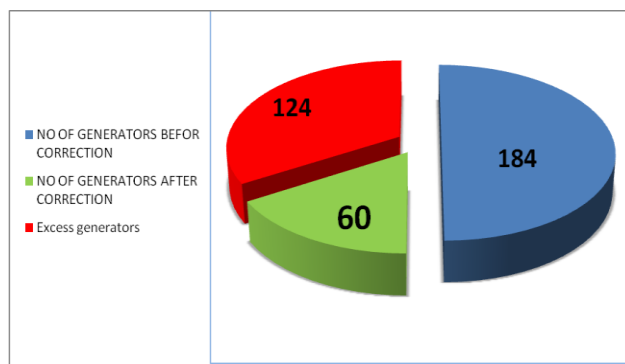


Fig. 4. Number of generator before and after correction

The main goal we can use 60 diesels Generator to supply all the ESP wells, and the rest (124) will be spare parts for our stations. it mean we can supply the power continuous for five year with any extended or increase on load without buy any spare parts .that is big achievement.

Methodology

For Parallel operate of electrical power generators we will do: 1.6.Must be locate the ten area (10 zone) are distributed at all the area of Rumaila and locate near the separation of gas station (DS), and near locate of electrical overhead transmission lines (medium voltage 11 KV, 6.6 KV) fig(5).

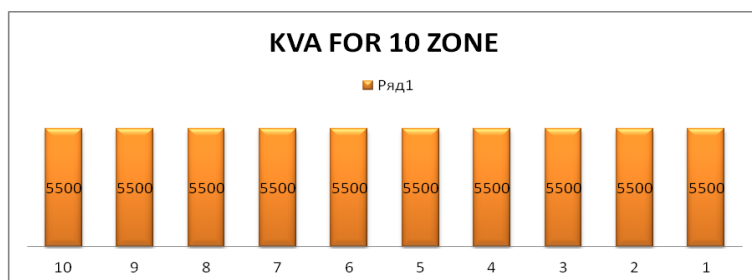


Fig. 5. Number of zones for coverage all Rumaila field area

Every zone consist of 20 diesel generators to supply of 550 KVA electrical power as fig (6).

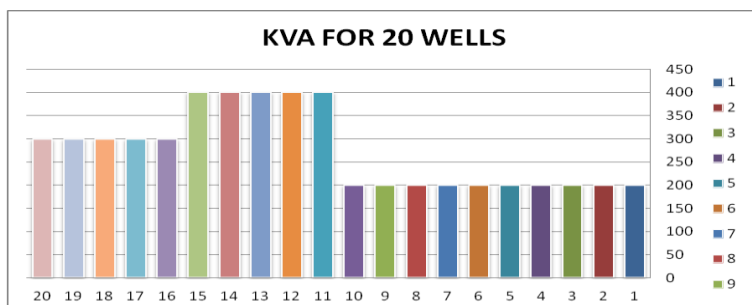


Fig. 6. Number of diesel generators for one zone

3.6. The 550 KVA of generators twenty will distribute for the following: table 1.

Table 1

Types and power rated of GE

No of GE	Types of GE	KVA
20	Caterpillar	1250
10	Jinan	280
10	Perkins+ Jinan	550
20	Caterpillar + Perkins	1100

If a group of generators are installed in parallel with each other at one place to be one feeding source for electricity (Power feeding station) and then this voltage will be raised through voltage transformers to be medium voltages (11 KV) to be transmitted through recycling distribution for zones [6,7,9] in compliance with the number of wells and its electricity powers. The choice of optimum position of set diesel generators depends on reference information on the elements of the maximum cross-section of wires, their brand, cross-section, linear mass, parameters of supports, step-down transformers. When developing an algorithm for constructing SES wiring for wiring, the cost of the designed network is taken as the main criterion. The task of building SES can be represented as the construction of connecting trees of a special type - Steiner trees.

Power System study bases

Software tool and methodologies

ETAP version 14.1.0 has been used for the study. Newton Raphson method has been used for solving iteratively the load flow equations. The Newton Raphson method possesses unique quadratic convergence characteristics. It has a very fast convergence speed compared to other load flow calculation methods. Short circuit performance analyses the effect of 3 phase and line to ground faults in the system. The program calculates the short circuit currents I_k'' , I_b , I_p , I_k with the contribution from motor load, and utility tie in. Fault duties are in compliance with the latest edition of IEC 60909.

Input Data

Input Data used for the network analysis are as below:

Grid short circuit contribution from EPP (PP01-706-ESB001) (Data based on EPP Power system study

- Maximum Short Circuit Level
- Three Phase Fault – 13.83 KA
- Single Phase Fault – 0.207 kA
- Positive Sequence X/R Ratio – 16.55
- Zero Sequence X/R Ratio – 0.47
- Minimum Short Circuit Level
- Three Phase Fault – 4.463 kA
- Single Phase Fault – 0.161 kA
- Positive Sequence X/R Ratio – 10.11
- Zero Sequence X/R Ratio – 0.56

Cable and OTHL Conductors

- 11kV Cable and OHTL are as per Cable schedule
- 400V Cables not included in study.

Well site Equipment

- Transformers
- 11/0.42kV ONAN
- 4% Impedance for 500kVA, 5% Impedance for 1000kVA.
- Dyn1
- Primary Winding: Delta

- Secondary Winding Solidly Earthed.

Each well site is assumed to have an average load of 300kVA at each well site, as per the Basis of design For Pre-FEED analysis purposes the ESPs (consisting of VFD and Motor) at each well site have been modelled identically such that all well sites have a total power draw of 300kVA at 400V [8.10].

After collecting all the information and complete the technical studies and calculate the all coefficients of network and loads . And after locate the suitable position for main power plant. We will start construction and install concrete basis for GE and OHL .Beyond that we will connect the wiring and finishing works.

References

1. Saurabh Kumar. Designing Of An Electrical Submersible Pump.- International Journal of Scientific & Engineering Research , Vol.4, Issue 9,September-2013.P.874-878.
2. Thorsen, O. V. Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps. O. V. Thorsen, M. Dalva. IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – Vol. 37. – № 2. – P. 541–547.
3. D. J. Carnovale. Design, Development and Testing of a Voltage Ride-Thru Solution for Variable Speed Drives in Oil Field Applications .2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. – IEEE, 2007. – P. 1–7.
4. Fleming, E. Power consumption evaluation for electrical submersible pump systems . E. Fleming, L. Xiaodong . 48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference. – IEEE, 2012. – P. 1–6.
5. Sushkov, V. V. Specific of Ride Through Solutions for Electric Submersible Pumps with Adjustable Speed Drive. V. V. Sushkov, A. S. Martianov . Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk: IEEE, 2014. – P. 1–4.
6. Ramli, M. A. M. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage .M. A. M. Ramli, A. Hiendro, S. Twaha. Renew. Energy. – 2015. – Vol. 78. – P. 398–405.
7. Caterpillar operation and maintenance manual generators.- Printed in U.S.A.,2014.-View 83.
8. Dixon J., Moran L., Rodrigues J., Domke R. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review. – Proc. of the IEEE, Vol. 93, No. 12, 2005, pp. 2144-2164.
9. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Wiley-IEEE Press, N. J., 2007, 375 pp.
10. Yazdani D., Bakhshai, Jain P. A three-phase adaptive notch filter- based approach to harmonic reactive current extraction and harmonic decomposition. – IEEE trans. on power electronics, Vol. 25, No. 4, 2010, pp. 914-923.

Authors of the publication

Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali – PhD student, Chief Engineer of «Rumaila Operating Organization».

Vladimir Yu Kornilov – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Kazan State Power Engineering University.

Anton G. Gorodnov –senior lecturer Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Поступила в редакцию

03 декабря 2018 г.



МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.Ю. Афанасьев, Н.А. Рыбушкин, К.А. Килиманов

КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

nikolay_rybushkin@mail.ru

Резюме: Объект исследования – гибридная силовая установка автобуса с дизельным двигателем и синхронным электродвигателем. Цель работы – разработка инженерных моделей синхронного электродвигателя и дизельного двигателя, поиск оптимальных по потреблению электроэнергии законов управления токами электродвигателя и оптимальных по общему энергопотреблению законов движения автобуса с гибридной силовой установкой. Были применены модели синхронного электропривода и двигателя внутреннего сгорания, удобные для исследования, использованы аналитические и численные методы параметрической оптимизации и оптимального управления. Получены значения параметров и законы движения транспортного средства с энергосбережением.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, дизельный двигатель, синхронный электродвигатель, оптимальное управление токами, мощность потерь.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.

Для цитирования: Афанасьев А.Ю., Рыбушкин Н.А., Килиманов К.А. Моделирование и оптимизация по энергопотреблению гибридной силовой установки для транспортного средства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 133-143. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.

MODELING AND OPTIMIZATION ON ENERGY CONSUMPTION OF A HYBRID POWER INSTALLATION FOR A VEHICLE

A.Y. Afanasiev, N.A. Rybushkin, K.A. Kilimanov

KNRTU-KAI named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia

nikolay_rybushkin@mail.ru

Abstract: The object of research is a hybrid power installation of a bus with a diesel engine and a synchronous electric motor. The purpose of the work is the development of engineering models of a synchronous electric motor and a diesel engine, the search for optimal electric currents control laws for electric motor and optimal bus moving laws with a hybrid power installation for general energy consumption. Synchronous electric drive and internal combustion engine models were used, convenient for research, analytical and numerical methods of parametric optimization and optimal control were used. Parameter values and laws of vehicle motion with energy saving are obtained.

Keywords: hybrid power plant, diesel engine, synchronous electric motor, optimum control of currents, power of losses.

For citation: A.Y. Afanasiev, N.A. Rybushkin, K.A. Kilimanov. Modeling and optimization on energy consumption of a hybrid power installation for a vehicle. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 133-143. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.*

Введение

Гибридные силовые установки (ГСУ) применяются на колесном транспорте для достижения двух основных целей – экономия топлива и уменьшение выброса вредных веществ в атмосферу. Одним из путей экономии энергии является оптимальное управление токами электродвигателя по критерию минимума мощности, потребляемой от источника электроэнергии, при создании требуемого электромагнитного момента, а также оптимальное управление движением инерционного объекта с основными компонентами статического момента по тому же критерию, когда отыскиваются оптимальные законы изменения электромагнитного момента, скорости и пути объекта в функции времени [1].

В настоящей работе приводятся результаты решения этих задач для синхронного двигателя. Проведено моделирование синхронного электродвигателя и дизельного двигателя при их работе на общую нагрузку. Изложена общая методология построения оптимальных законов управления токами ЭД и движением инерционного объекта. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие находить оптимальные законы управления токами ЭД и оптимальные законы движения ТС с переключением скоростей.

Синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением

Рассмотрим синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением. Его электромагнитный момент определяется формулой:

$$M = c_a \Phi I \sin \theta + c_p I^2 \sin 2\theta,$$

где Φ – основной магнитный поток, созданный ротором-индуктором; I – действующее значение тока обмотки якоря (статора); θ – угол между осью МДС обмотки якоря и продольной осью ротора-индуктора; c_a , c_p – конструктивные коэффициенты активного и реактивного моментов [2].

Если магнитопровод двигателя не насыщен, то можно положить:

$$\Phi = k_\Phi i_b,$$

где i_b – ток обмотки возбуждения.

Мощность электрических потерь определяется формулой

$$P = 3rI^2 + r_b i_b^2.$$

Требуется найти токи I , i_b и угол θ , при которых создается требуемый электромагнитный момент M^0 , а мощность потерь P минимальна.

В ходе решения данной задачи методом множителей Лагранжа получим формулу для оптимального угла θ :

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{8c_p r_b}{\lambda c_a^2 k_\Phi^2}.$$

Проведем решение задачи оптимального управления токами с помощью теории обобщенной электрической машины [3]. Электромагнитный момент определяется выражением

$$M = p i_q (k_\Psi i_f + \Delta L i_d). \quad (1)$$

Здесь p – число пар полюсов; i_d, i_q – токи продольной и поперечной фаз обобщенной машины, соответствующей синхронному двигателю с электромагнитным возбуждением; i_f – ток обмотки возбуждения; k_Ψ – коэффициент потокосцепления; ΔL – разность индуктивностей продольной и поперечной фаз.

Мощность электрических потерь

$$P = r(i_d^2 + i_q^2) + r_f i_f^2.$$

Здесь r – активное сопротивление фазы статора обобщенной машины; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения.

Найдем токи i_d, i_q, i_f , при которых создается требуемый электромагнитный момент M° , а мощность электрических потерь P минимальная [4].

Составим функцию Лагранжа и запишем условия ее стационарности по всем токам, представив в следующем виде:

$$\begin{aligned} r i_d &= \lambda p i_q \Delta L; \\ r i_q &= \lambda p (k_\Psi i_f + \Delta L i_d); \\ r_f i_f &= \lambda p_\Pi i_q k_\Psi. \end{aligned} \quad (2)$$

Из этих уравнений можно выразить токи i_d, i_q через ток возбуждения i_f :

$$i_q = \frac{r_f i_f}{\lambda p_\Pi k_\Psi}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{\Delta L r_f i_f}{k_\Psi r}. \quad (4)$$

Подставим эти выражения в уравнение (2) и найдем отсюда множитель Лагранжа λ :

$$\lambda p_\Pi = r \sqrt{\frac{r_f}{r k_\Psi^2 + r_f (\Delta L)^2}}. \quad (5)$$

Соотношение между продольным и поперечным токами обмотки статора определяет угол θ между продольной осью ротора и вектором МДС статора. Справедливо равенство

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{i_q}{i_d} = \frac{r}{\lambda p_\Pi \Delta L}.$$

Его можно представить в виде

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\frac{r k_\Psi^2 + r_f (\Delta L)^2}{r_f (\Delta L)^2}}.$$

Для определения требуемых токов подставим выражения (3), (4) в формулу (1) и с учетом формулы (5) получаем

$$M = \frac{p_\Pi}{k_\Psi^2} \left(\frac{r_f}{r} \right)^{1/2} \left(k_\Psi^2 + \frac{(\Delta L)^2 r_f}{r} \right)^{3/2} i_f^2. \quad (6)$$

Формула связи мощности электрических потерь и момента имеет вид

$$P = r(i_d^2 + i_q^2) + r_f i_f^2 = \left(\frac{r r_f^2}{(\lambda p_\Pi k_\Psi)^2} + \frac{r (\Delta L r_f)^2}{(k_\Psi r)^2} + r_f \right) i_f^2$$

или, сравнивая с формулой (6),

$$P = c_0 M.$$

С учетом магнитных потерь в стали формула приобретает вид

$$P = |M| (c_0 + c_1 |\omega| + c_2 \omega^2).$$

Знаки модуля позволяют применить эту формулу при любом знаке частоты вращения ω .

Дизельный двигатель внутреннего сгорания

Рассмотрим дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) [5]. Внешняя скоростная характеристика мощности ДВС при полной подаче топлива

$$P_{1B} = P_m(a_0\bar{\omega} + a_1\bar{\omega}^2 - a_2\bar{\omega}^3) = P_mk_p(\bar{\omega}),$$

где a_0, a_1, a_2 – постоянные положительные коэффициенты; P_m – максимальное значение мощности при полной подаче топлива и при частоте вращения ω_p ; $\bar{\omega}$ – относительная частота вращения:

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_p.$$

Внешняя скоростная характеристика момента при полной подаче топлива:

$$M_{1B} = M_p(a_0 + a_1\bar{\omega} - a_2\bar{\omega}) = M_pk_M(\bar{\omega}),$$

тогда

$$k_p(\bar{\omega}) = \bar{\omega}k_M(\bar{\omega}).$$

Запас крутящего момента:

$$m_3 = \frac{M_m - M_p}{M_p}.$$

где M_m – максимальный момент при полной подаче топлива, который достигается при частоте вращения ω_M ; M_p – момент при полной подаче топлива и $\omega_1 = \omega_p$.

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 находятся по формулам:

$$a_0 = 2 - \frac{1}{4m_3}; \quad a_1 = \frac{1}{2m_3} - 1; \quad a_2 = \frac{1}{4m_3}.$$

Степень использования мощности или момента:

$$u_1 = \frac{P_1}{P_{1B}} = \frac{M_1}{M_{1B}}.$$

Текущая мощность ДВС:

$$P_1 = u_1P_{1B} = u_1P_mk_p.$$

Текущий момент ДВС:

$$M_1 = u_1M_{1B} = u_1M_pk_M.$$

ДВС имеет расходную характеристику

$$G = G(M_1, \omega_1).$$

Удельный расход топлива g , кг/с·Вт:

$$g = k_\omega k_u g_p,$$

где k_ω – коэффициент, зависящий от частоты вращения:

$$k_\omega = 1,23 - 0,79\bar{\omega} + 0,56\bar{\omega}^2 = b_0 - b_1\bar{\omega} + b_2\bar{\omega}^2,$$

k_u – коэффициент, зависящий от u_1 :

$$k_u = 1,7 - 2,62u_1 + 1,92u_1^2 = d_0 - d_1u_1 + d_2u_1^2,$$

g_p – удельный расход топлива при полной подаче и частоте вращения ω_p .

Секундный расход топлива:

$$G = gM_1\omega_1 = gP_1 = k_\omega k_u g_p P_mk_p u_1 = u_1 k_p k_u k_\omega G_p,$$

где G_p – максимальный расход топлива при $\omega = \omega_p$:

$$G_p = g_p \cdot P_m.$$

Была составлена модель дизельного двигателя в пакете *Simulink* ПО *Matlab* для построения основных скоростных характеристик ДВС [6]. Приняты следующие значения параметров.

Максимальная мощность $P_m=100$ кВт. Частота вращения при максимальной мощности $\omega_P = 200$ с⁻¹. Удельный расход топлива при этом $g_P = 6 \cdot 10^{-8}$ кг/с·Вт, а секундный расход топлива $G_P = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Частота вращения ω_1 изменялась в пределах от 0 до 250 с⁻¹. На рис. 1 показана данная модель дизельного двигателя.

Для построения характеристик дизельного двигателя была составлена модель содержащая пять моделей дизельных двигателей, на входы которых подаются различные значения степени использования по мощности и одинаковый сигнал по скорости вращения вала. На рис. 2 показаны результаты моделирования, а именно зависимости $M(\omega_1)$, и $G(\omega_1)$ при пяти значениях степени использования u_1 : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0. Отмечены частоты с максимальным моментом ω_M , с максимальной мощностью ω_P и с максимальным потреблением топлива ω_G . Масштабы для величин: $M_1 - 1$; $P_1 - 0,005$; $G - 100\,000$.

Данная модель дизельного двигателя при наличии значений параметров M_m , M_P , ω_P и g_P позволяет моделировать конкретный дизельный двигатель с учетом степени использования по мощности и проводить расчеты секундного расхода топлива.

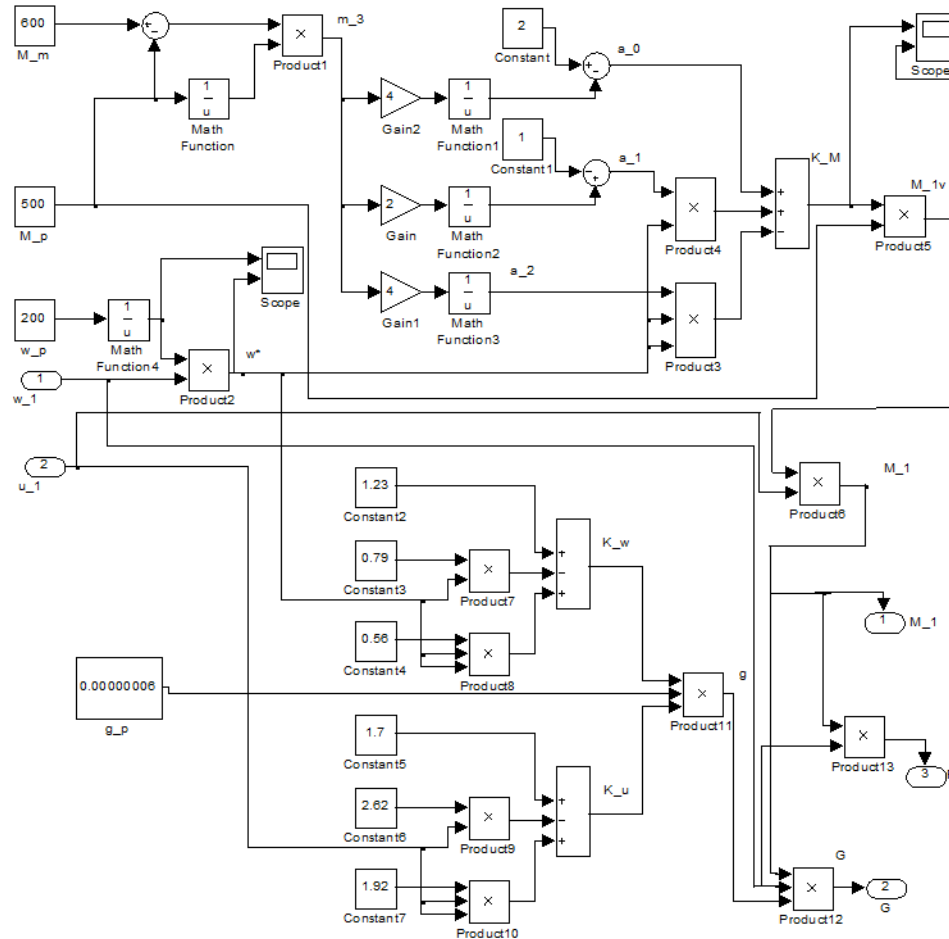


Рис. 1. Модель дизельного двигателя

Оптимальное управление движением ТС с переключением скоростей

Гидромеханическая передача (ГМП), входящая в состав ГСУ, может работать в двух режимах. При трогании и разгоне транспортного средства (ТС) механическая мощность передается через гидротрансформатор (ГТ), у которого частоты вращения входного и выходного валов могут быть произвольными в определенных пределах, а момент передается через рабочую жидкость. Такая механическая связь в теоретической механике называется неголономной (нежесткой) [7].

После набора достаточной скорости ТС происходит переключение ГМП на режим жесткой связи между скоростями входного и выходного валов. Такая механическая связь называется голономной (геометрической, жесткой).

На рис. 3 показана функциональная схема ГСУ с голономной связью [8].

Движение ТС с ГСУ описывается уравнениями

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)] / J_4. \quad (8)$$

Здесь $x_1 = \alpha_4$, $x_2 = \omega_4$ – угол поворота и частота вращения выходного вала ГМП; u_1 – степень использования дизельного двигателя ДВС по мощности и моменту; $u_2 = I$ – ток ЭД; J_4 – суммарный момент инерции ДВС, ЭД, приведенный к выходному валу ГМП; M_{4c} – приведенный статический момент сопротивления.

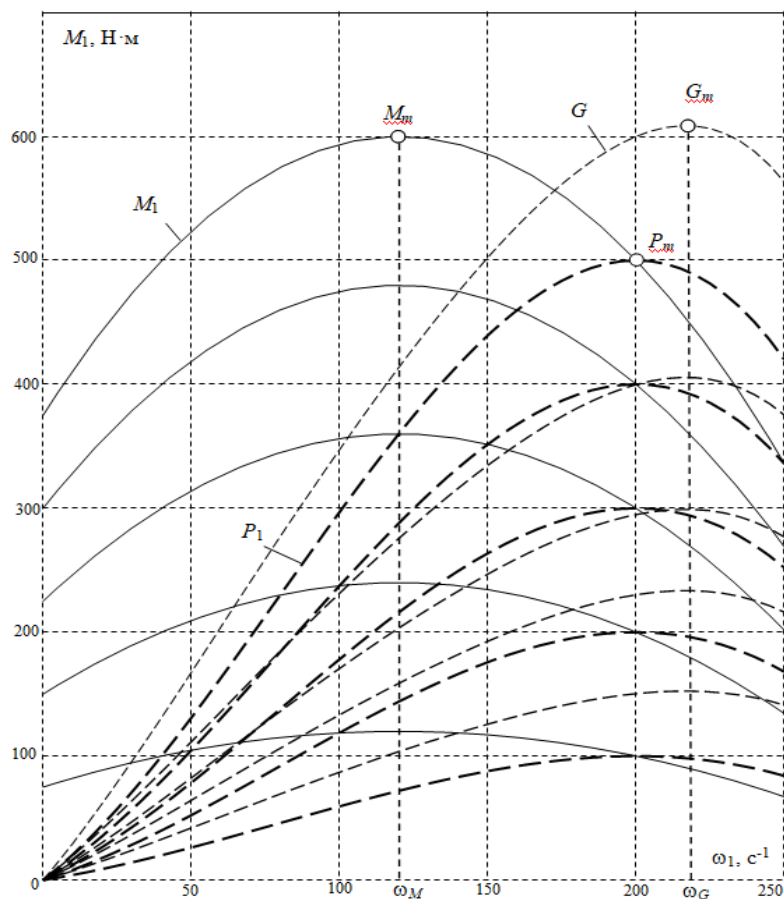


Рис. 2. Скоростные характеристики $M_1(\omega_1)$, $P_1(\omega_1)$ и $G(\omega_1)$

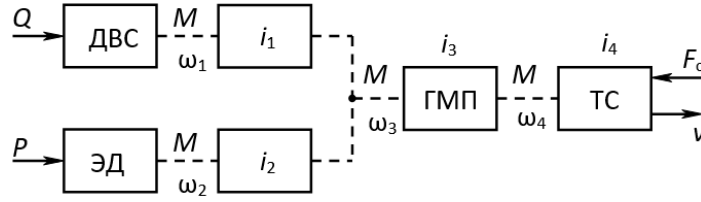


Рис. 3. Функциональная схема ГСУ с голономной связью

Момент ЭД M_2 и момент инерции ЭД пересчитаны на передаточное отношение ДВС i_1 . Момент инерции J_4 определяется по формуле

$$J_4 = J_A + i^2 J_D,$$

где J_A – момент инерции, эквивалентный массе автобуса; J_D – эквивалентный момент инерции ЭД и ДВС; $i = i_1 \cdot i_3$ – передаточное отношение от коленчатого вала ДВС до выходного вала ГМП.

Величины x_1 и x_2 играют роль фазовых координат, а величины u_1 и u_2 – роль управляющих воздействий.

Предполагается, что функции $M_1(u_1, x_2)$, $M_2(u_2)$, $M_c(x_1, x_2)$, $G(u_1, x_1)$, $P(u_2, x_2)$ известны. Задан интервал времени $[t_0, t_f]$, начальные и конечные условия:

$$x_1(t_0) = x_{10}; \quad x_2(t_0) = x_{20}; \quad x_1(t_f) = x_{1f}; \quad x_2(t_f) = x_{2f}.$$

Отметим, что конечное значение x_{1f} принимается произвольным [9].

Требуется найти законы изменения управляющих воздействий $u_1(t)$ и $u_2(t)$, при которых функционал

$$V = \int_{t_0}^{t_f} (a_D G(u_1, x_2) + a_E P(u_2, x_2)) dt \quad (9)$$

имеет минимальное значение. Здесь a_D , a_E – весовые коэффициенты, определяющие ценность дизельного топлива и электрической энергии.

Гамильтониан и дифференциальные уравнения относительно сопряженных переменных имеют вид:

$$\begin{aligned} H = & -a_D G(u_1, x_2) - a_E P(u_2, x_2) + \psi_1 x_2 + \\ & + \psi_2 [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)] / J_4 \Rightarrow \max; \\ \frac{d\psi_1}{dt} = & -\frac{\partial H}{\partial x_1} = \frac{\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_1} = 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = a_D \frac{\partial G}{\partial x_2} + a_E \frac{\partial P}{\partial x_2} - \psi_1 - \frac{\psi_2}{J_4} \left(i \frac{\partial M_1}{\partial x_2} - \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_2} \right). \quad (11)$$

Примем начальное значение $\psi_1(0) = 0$. Это соответствует случаю, когда конечное значение угла α безразлично, а конечное значение частоты вращения ω управляется с помощью начального значения сопряженной переменной $\psi_2(0)$. Моменты времени переключения t_1 , t_2 могут быть найдены из условия постоянства гамильтониана H .

Условия максимума гамильтониана H по управляющим воздействиям u_1 , u_2 во внутренних точках имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial u_1} = & -a_D \frac{\partial G}{\partial u_1} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_1}{\partial u_1} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial u_2} = & -a_E \frac{\partial P}{\partial u_2} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_2}{\partial u_2} = 0. \end{aligned}$$

Предполагается, что в моменты переключения происходят мягкие (вязкие) удары, в результате которых происходит скачкообразное изменение частот вращения двигателей ТС при сохранении момента количества движения, но с потерей части кинетической энергии. Новые частоты вращения определяются по формулам:

$$\begin{aligned}x_2(t_1 + 0) &= x_2(t_1 - 0)(J_A + i'J_D)/(J_A + i''J_D); \\x_2(t_2 + 0) &= x_2(t_2 - 0)(J_A + i''J_D)/(J_A + i'''J_D).\end{aligned}$$

Была разработана программа SYDIHIPE в системе Turbo-Pascal. Эта программа имеет 4 процедуры.

Процедура *GDPEMDME* вычисляет относительную частоту вращения ДВС $\bar{\omega}$, значения коэффициентов $f_M(\bar{\omega})$, $f_P(\bar{\omega})$, $f_{\omega}(\bar{\omega})$, оптимальное значение степени использования ДВС u_1 , коэффициент $f_u(u_1)$, момент ДВС M_1 , секундный расход топлива G , оптимальное значение управления электродвигателем u_2 , его момент M_2 и потребляемую им мощность P , статический момент нагрузки M_{4c} , частные производные от моментов M_1 , M_2 и M_{4c} , от расхода топлива G и мощности P по частоте вращения выходного вала ГМП.

Процедура *DER* проверяет условия достижения времени переключения скоростей ГМП и при выполнении одного из условий вычисляет новые значения частоты вращения входного и выходного валов ГМП согласно гипотезе абсолютно вязкого удара, т.е. с сохранением количества движения (кинетического момента) автомобиля и вращающихся частей. Она вычисляет правые части дифференциальных уравнений движения (7), (8), дифференциальных уравнений сопряженных переменных (10), (11) и суммарного расхода энергетических ресурсов (9). Эта процедура вызывает процедуру *GDPEMDME* один раз.

Процедура *RUNCUT* имеет универсальную форму и выполняет один шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты. Она обращается к процедуре *DER* четыре раза.

Процедура *MAIN* выполняет интегрирование системы из $m = 5$ дифференциальных уравнений. Количество шагов $n = 20\,000$, шаг интегрирования $h = 0,5$ мс. В начале процедуры устанавливается начальное значение передаточного отношения ГМП i , а также начальные значения всех искомым функций, кроме ψ_2 . Логическим переменным *LOG1*, *LOG2* присваивается значение *TRUE*, которое сбрасывается при соответствующем переключении в процедуре *DER*.

В теле цикла со счетчиком j фиксируются значения гамильтониана H до момента переключения ГМП и после него для вычисления приращения гамильтониана. Выполняется рисование графиков на экране дисплея и вызов процедуры *RUNCUT* один раз.

В исполняемой части программы всем параметрам присваиваются их значения, устанавливаются масштабы и цвета рисования.

Выполняются четыре итерации методом Ньютона поиска начального значения сопряженной переменной $\psi_2(0)$ и моментов времени переключения передач ГМП t_1 , t_2 из условия достижения требуемой частоты вращения выходного вала ГМП $\omega(t_f) = 160 \text{ с}^{-1}$ и непрерывности гамильтониана H в моменты переключения t_1 , t_2 . Счетчик цикла – k . После четырех итераций все условия выполняются с высокой точностью.

Результаты вычислений:

Начальный вариант: $\omega(t_f) = 151,32$; $dH_1 = -0,002816$; $dH_2 = -0,000101$.

Первая итерация: $\omega(t_f) = 160,085$; $dH_1 = -0,001362$; $dH_2 = -0,000898$.

Вторая итерация: $\omega(t_f) = 159,975$; $dH_1 = 0,000102$; $dH_2 = -0,000047$.

Третья итерация: $\omega(t_f) = 159,998$; $dH_1 = -0,000002$; $dH_2 = 0,000000$.

Значения искомым величин, соответствующие оптимальному управлению:

$\psi_2(0) = 0,00055477$; $j_{s1} = 8584$; $j_{s2} = 14049$.

Графики сигналов приведены на рис. 4.

Видно, что по мере разгона момент ДД уменьшается при каждом передаточном отношении. После каждого переключения скорости происходит быстрый наброс момента ДД. Далее, по мере разгона момент ЭД растёт [10].

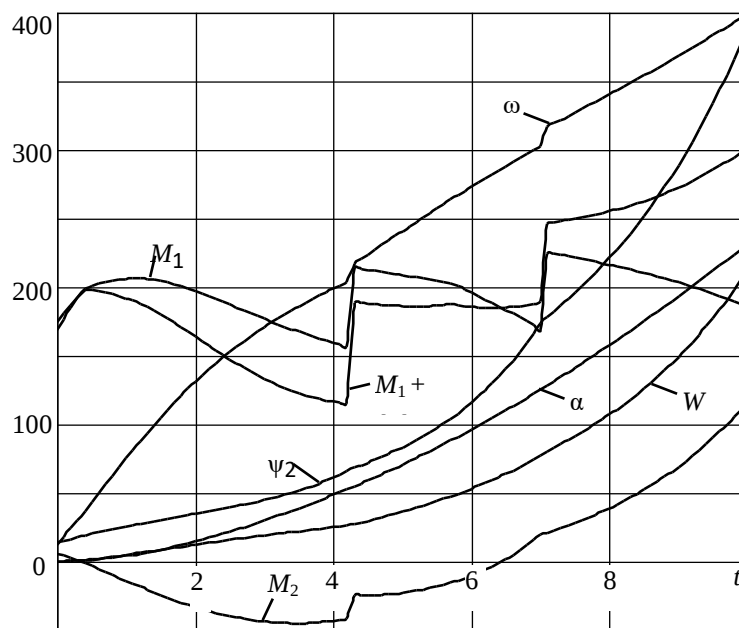


Рис. 4. Графики сигналов при разгоне автомобиля с ГСУ и двумя переключениями скорости

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения работы удалось построить аналитические модели синхронного электродвигателя и дизельного двигателя внутреннего сгорания, позволившие решить задачу оптимального управления токами электродвигателя для создания требуемого электромагнитного момента при минимальной потребляемой мощности и решить задачу оптимального управления движением транспортного средства с переключением скоростей. Данные результаты помогут достичь оптимального использования ЭД и ДВС по выдаваемой суммарной мощности при экономии электрической энергии и дизельного топлива.

Литература

1. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода. Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 208 с.
2. Красовский А.Б. Основы электропривода. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 405 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.
4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. 373 с.
5. Bosch Automotive Handbook. 9th ed. edition. Robert Bosch GmbH, 2014. 1544 p.
6. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Издательство «Корона.Век», 2014. 368 с.

7. Москаленко В.В. Электрический привод. 7-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 368 с.
8. Wang X., He H., Sun F., Sun X., Tang H. Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *Energies* 2013, 6, 5656–5675.
9. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. 3-е изд. М.: «Академия», 2007. 576 с.
10. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург, УГТУ–Упи, 2006. 420 с.

Авторы публикации

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: afanasiev_eo@mail.ru.

Рыбушкин Николай Анатольевич – студент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: nikolay_rybushkin@mail.ru.

Килиманов Константин Алексеевич – студент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: kostik.kilimanov@mail.ru.

References

1. Moskalenko V.V. Automated control systems for electric drive. Vologda: Infra-Engineering, 2016. 208 p.
2. Krasovskiy A.B. Basics of the electric drive. Moscow: Publishing house MSTU named after N.E. Bauman, 2015. 405 p.
3. Ivanov-Smolensky A. V. Electric machines. 3rd ed. M.: Publishing house MEI, 2006. 652 p.
4. Anuchin A.S. Control systems of electric drives. Vologda: Infra-Engineering, 2015. 373 p.
5. Bosch Automotive Handbook. 9th ed. edition. Robert Bosch GmbH, 2014. 1544 p.
6. Herman-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. СПб.: Publishing house "Korona.Vek", 2014. 368 p.
7. Moskalenko V.V. Electric drive. 7th ed. Moscow: Publishing Center "Academy", 2014. 368 p.
8. Wang X., He H., Sun F., Sun X., Tang H. Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *Energies* 2013, 6, 5656–5675.
9. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes. 7th ed. M.: "Academy", 2007. 576 p.
10. Polyakov V.N., Shreiner R.T. Extreme control of electric motors. Ekaterinburg, USTU–Upi, 2006. 420 p.

Authors of the publication

Afanasyev Anatoly Yurievich – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. Email: afanasiev_eo@mail.ru.

Rybushkin Nikolay Anatolevich – student Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. E-mail: nikolay_rybushkin@mail.ru.

© А.Ю. Афанасьев, Н.А. Рыбушкин, К.А. Килиманов

Kilimanov Konstantin Alekseevich – student Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. E-mail: kostik.kilimanov@mail.ru.

Поступила в редакцию

11 апреля 2018 г.



УДК 621.315.614, 676.254.2

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

¹В.К. Козлов, ¹М.Ш. Гарифуллин, ¹А.Х. Сабитов, ²Р.А. Гиниатуллин

¹Казанский государственный энергетический университет

²Казанский национальный исследовательский технологический университет

Резюме: Исследовано влияние термодеструкции бумаги на ее спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции в спектральных диапазонах 400–550 нм и 250–450 нм соответственно. Предложено использовать характерные изменения интенсивности и формы спектров люминесценции в качестве критерия состояния бумажной изоляции силовых трансформаторов. На основе проведенного анализа сделан вывод, что при возбуждении люминесценции длиной волны 360 нм ни один из основных компонентов бумаги не может давать вклад в регистрируемые спектры люминесценции. Сделано предположение, что полученные спектры люминесценции обусловлены свечением различных примесей, попадающих в бумагу в процессе ее производства.

Ключевые слова: оптическая спектроскопия, спектры люминесценции, спектры возбуждения люминесценции, спектры поглощения, бумага, степень полимеризации бумаги, термодеструкция, целлюлоза, лигнин, гуминовые вещества, растворенные органические вещества.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-144-151.

Для цитирования: Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш., Сабитов А.Х., Гиниатуллин Р.А. Люминесцентные свойства бумажной изоляции маслонаполненных трансформаторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 144-151. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-144-151.

FLUORESCENT PROPERTIES OF PAPER INSULATION OF OIL-FILLED TRANSFORMERS

V.K. Kozlov¹, M.Sh. Garifullin¹, A.Kh. Sabitov¹, R.A. Giniatullin²

¹Kazan State Power Engineering University

²Kazan National Research Technological University

Abstract: The effect of paper thermal destruction on its luminescence spectra and luminescence excitation spectra in the spectral ranges of 400-550 nm and 250-450 nm, respectively, was studied. It is proposed to use the characteristic changes in the intensity and shape of the luminescence spectra as a criterion for the state of paper insulation of power transformers. On the basis of the analysis performed, it was concluded that when luminescence is excited at a wavelength of 360 nm, none of the main components of the paper can contribute to the recorded luminescence spectra. It is assumed that the resulting luminescence spectra are due to the emission of various impurities that enter the paper during its production.

Keywords: *Optical spectroscopy, luminescence spectra, luminescence excitation spectra, absorption spectra, paper, the degree of polymerization of paper, thermal destruction, cellulose, lignin, humic substances, dissolved organic substances*

For citation: V.K. Kozlov, M.Sh. Garifullin, A.Kh. Sabitov, R.A. Giniatullin. *Fluorescent properties of paper insulation of oil-filled transformers. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 144-151. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-144-151.*

Введение

Силовые маслонаполненные трансформаторы являются одним из наиболее дорогих, сложно диагностируемых видов электрооборудования. При этом срок эксплуатации некоторых трансформаторов превышает нормативно установленное значение более чем в 2 раза. Во многих случаях длительный срок эксплуатации обусловлен не столько отсутствием финансовой возможности замены, сколько отсутствием технической необходимости в этом, поскольку значительная часть деталей и узлов трансформатора может быть восстановлена или заменена. Основным ограничивающим фактором для дальнейшей эксплуатации трансформаторов является неудовлетворительное состояние бумажной изоляции, что может привести к фатальным авариям. В этой связи контроль состояния бумажной изоляции относится к числу наиболее важных мероприятий, позволяющих определить возможность продления ресурса маслонаполненного трансформатора.

В качестве критерия состояния электроизоляционной бумаги используется величина средней степени полимеризации (СП) макромолекул целлюлозы, составляющей основу всех видов бумаг. В настоящее время этот параметр определяется согласно методическим указаниям [1]. Данный способ относится к косвенным методам, поскольку СП вычисляется по измеренной вязкости раствора бумаги в определенном растворителе. Определение значений молекулярного веса целлюлозы на основании вискозиметрических измерений не является вполне точным и однозначным. Кроме того, химическая агрессивность используемых реактивов, сложность и высокая стоимость такого анализа являются ограничивающими факторами для широкого использования данного метода.

В качестве альтернативы химическому анализу для контроля состояния бумажной изоляции, а также природы изменения механических характеристик может быть использована оптическая спектроскопия в видимой, ИК, а также ближней ИК-областях спектра. Следует отметить, что применительно к изоляционным маслам оптическая спектроскопия зарекомендовала себя как эффективный и удобный инструмент контроля состояния жидкой изоляции [2, 3]. Для анализа может быть использовано свойство бумаги люминесцировать (флуоресцировать) под воздействием внешнего ультрафиолетового (УФ) излучения [4]. Люминесцентные свойства бумаги, а также их природа являются предметом исследования в данной работе.

В условиях эксплуатации на скорость деградации бумажной изоляции влияют такие факторы, как температура в баке трансформатора, влагосодержание твердой изоляции, окисленность окружающего бумагу трансформаторного масла, а также содержание растворенного в масле кислорода [5]. Учет всех этих эксплуатационных факторов является сложной задачей, поэтому в экспериментах по искусственной деградации бумаги, как правило, ограничиваются воздействием только температурного фактора.

Эксперимент

Для проведения исследования были подготовлены образцы бумаги марки ТВ-120, которые подвергались термодеструкции при одинаковой температуре 150 °С в течение времени от 1 до 8 часов с дискретностью в 1 час. Далее для каждой серии образцов бумаги,

включая бумагу без термообработки, определялось среднее значение СП согласно [1]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость СП образцов бумаги от времени термодеструкции

Время термодеструкции, ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8
СП	584	524	441	417	410	328	282	272	223

Исследование люминесцентных свойств образцов бумаги из всех серий, представленных в табл. 1, проводилось с помощью спектрометра СДЛ-2 в спектральном диапазоне от 250 до 550 нм со спектральным разрешением 1 нм.

На рис. 1 показаны полученные спектры люминесценции (а) и спектры возбуждения люминесценции (б) бумаги. Спектры люминесценции получены при возбуждающем излучении с длиной волны $\lambda_{\text{возб.}} = 360$ нм. Спектры возбуждения люминесценции получены при регистрации люминесценции на длине волны $\lambda_{\text{рег.}} = 440$ нм.

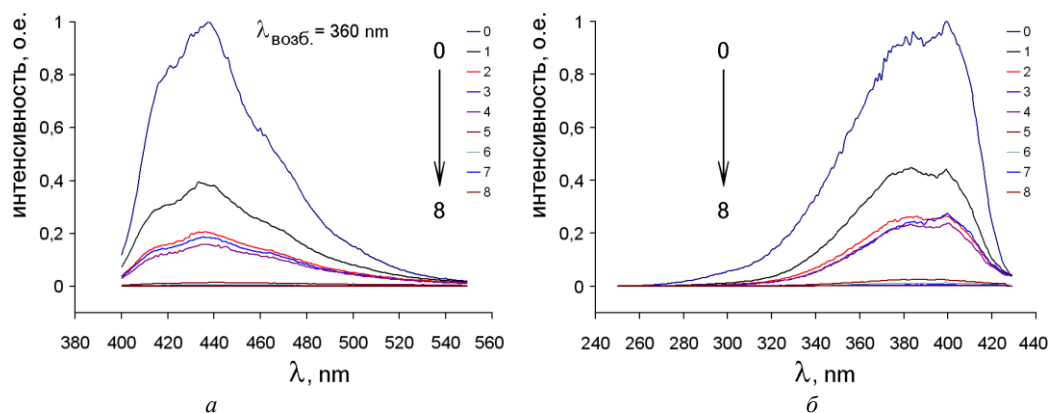


Рис. 1. Спектры люминесценции исследованных образцов бумаги ($\lambda_{\text{возб.}} = 360$ нм) – а и спектры возбуждения люминесценции ($\lambda_{\text{рег.}} = 440$ нм) – б.
Нумерация образцов согласно табл. 1

Стрелками на рисунке обозначен общий тренд на снижение интенсивности люминесцентных свойств бумаги в процессе ее деградации (от образца «0» к образцу «8»).

Положение пика люминесценции всех образцов находится в районе 439 нм. При этом по мере деградации бумаги наблюдается незначительное смещение пика в длинноволновую область спектра. На рис. 2, а показан график зависимости интенсивности люминесценции на длине волны 439 нм от времени термодеструкции бумаги. Полученная зависимость описывается уравнением

$$I_{\text{люм}_439} = 0,971 \cdot e^{-\frac{t}{1,348}},$$

где t – время деградации в часах. Коэффициент корреляции равен $R = 0,984$. Найденное уравнение, а также все последующие получены с помощью математического пакета программ *Origin*.

Пик интенсивности возбуждения на всех спектрах возбуждения люминесценции располагается на длине волны $\lambda = 400$ нм. Зависимость интенсивности возбуждения люминесценции на этой длине волны от времени термодеструкции показана на рис. 2, б. Уравнение зависимости имеет вид

$$I_{\text{ВОЗБ. ЛЮМ}_400} = 0,953 \cdot e^{-\frac{t}{1,794}}.$$

Коэффициент корреляции равен $R = 0,973$.

Также были найдены площади под кривыми спектров люминесценции и спектров возбуждения люминесценции (интегральные интенсивности). Зависимости площадей (в о.е.) от времени деградации бумаги показаны на рис. 3 и описываются следующими уравнениями:

$$S_{\text{ЛЮМ}} = 0,965 \cdot e^{-\frac{t}{1,579}},$$

коэффициент корреляции $R = 0,983$.

$$S_{\text{ВОЗБ}} = 0,957 \cdot e^{-\frac{t}{1,682}},$$

коэффициент корреляции $R = 0,977$.

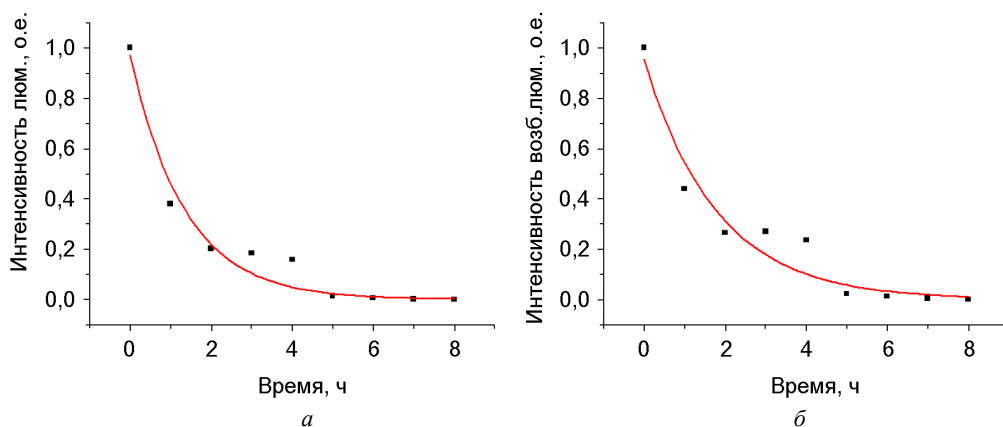


Рис. 2. Кривые зависимостей интенсивности люминесценции (а) и интенсивности возбуждения люминесценции (б) от времени деградации на длинах волн 439 и 400 нм соответственно

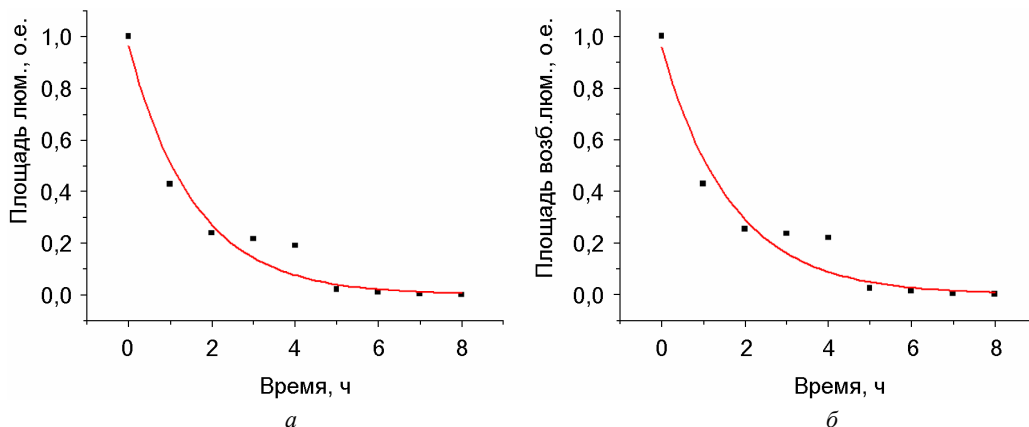


Рис. 3. Зависимость площади (в о.е.) под спектрами люминесценции (а) и спектрами возбуждения люминесценции (б) от времени деградации

В процессе деградации бумаги форма спектров их люминесценции претерпевает характерные изменения. Для наглядного представления этих изменений все спектры люминесценции были пронормированы на собственный максимум – рис. 4.

Отчетливо видно, что для исходного образца бумаги (№ 0) большая часть площади под кривой люминесценции располагается в сине-фиолетовой области. По мере роста степени деградации бумаги увеличивается и доля люминесценции в длинноволновой области видимого спектра. В результате происходит изменение цветового восприятия люминесценции бумаги. Также можно наблюдать, как было отмечено выше, одновременный сдвиг в длинноволновую область положения максимума спектра люминесценции бумаги.

Таким образом, в процессе термодеструкции интенсивность люминесценции бумаги в точке максимума ($\lambda \sim 439$ нм) уменьшается быстрее по сравнению с люминесценцией в длинноволновой области спектра.

Рассмотренные выше зависимости интенсивности, а также формы спектра люминесценции от времени деградации можно, с учетом табл. 1, представить в виде зависимости СП бумаги от параметров ее люминесценции. Использование таких зависимостей позволяет оценить степень деградации изоляционной бумаги электрооборудования по спектру люминесценции небольшого ее фрагмента, отобранного из оборудования [6, 7].

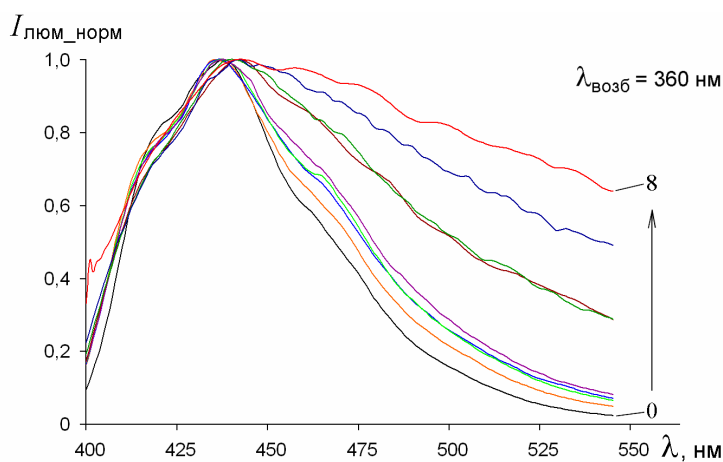


Рис. 4. Нормированные спектры люминесценции бумаги.
Нумерация образцов согласно табл. 1

Результаты и их обсуждение

Для выяснения природы люминесценции необходимо более внимательно рассмотреть компонентный состав бумаги и выявить возможность люминесценции отдельных ее составляющих. Основу изоляционной бумаги, изготавливаемой из чистых волокон небеленой сульфатцеллюлозы хвойных пород деревьев, составляет целлюлоза с остатками гемицеллюлозы, лигнина и древесных смол. Исходя из химической структуры этих веществ, все они могут поглощать электромагнитное излучение в УФ и видимой областях спектра. В то же время люминесцентными свойствами обладает только лигнин, что обусловлено наличием в его составе соединений ароматического характера [8]. Лигнин, придающий жесткость растительным волокнам и являющийся неотъемлемой их частью, невозможно полностью удалить из бумаги в процессе ее производства, что снижает как белизну бумаги, так и ее долговечность.

Спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции изученных образцов бумаги зеркально симметричны, что свидетельствует о том, что излучают те же молекулы, которые поглотили кванты света, то есть отсутствует передача энергии от одних центров люминесценции к другим.

Спектр люминесценции нативной целлюлозы в 50-х годах 20-го века исследовал Ермоленко [4], который обнаружил свечение в области 400 – 600 нм с максимумом в районе 470 нм. При этом было отмечено, что цвет люминесценции целлюлозных материалов часто зависит от содержания и состава примесей. Спектры люминесценции чистой целлюлозы в работе [4] не приведены, однако рассмотрены спектры поглощения образцов целлюлозы, в которых отсутствуют полосы поглощения в области 300 – 420 нм.

Наличие зеркальной симметрии спектров люминесценции и спектров возбуждения люминесценции, отсутствие у целлюлозы полос поглощения в области возбуждения люминесценции, а также указанная выше зависимость спектра люминесценции от примесей позволяют однозначно заключить, что регистрируемые спектры люминесценции не могут принадлежать самой целлюлозе, а обусловлены «свечением» микроскопических примесей, остающихся в процессе технологического изготовления целлюлозы.

Исследованный спектр люминесценции также не принадлежит лигнинам, так как спектры испускания лигнинов имеют максимум в районе 350 нм с плечом в районе 390 нм и возбуждаются излучением с длиной волны короче 300 нм [3].

Исследование химического состава смол древесины [9, 10] показывает, что их спектры люминесценции находятся в УФ области спектра, близкой к области люминесценции лигнинов. Поэтому люминесценция смол так же не может давать вклад в измеренную нами люминесценцию бумаги.

В работах [11, 12] показано, что во всех без исключения типах природной воды присутствуют растворенные органические вещества (РОВ). Типичный спектр флуоресценции РОВ при УФ излучении состоит из двух широких перекрывающихся полос: УФ полосы с максимумом в области 300 – 350 нм (флуоресценция белковых или фенольных соединений (лигнин, танин)) и свечение в видимой области спектра с максимумом около 400 – 450 нм (флуоресценция гуминовых соединений).

Гуминовые соединения имеют сложный состав с различным квантовым выходом люминесценции отдельных компонентов в области 400 – 600 нм, который и объясняет спектры флуоресценции РОВ и их зависимости от частоты возбуждения, аналогичные полученным нами спектрам люминесценции бумаги, и их изменениям в процессе термодеструкции (рис. 4).

Наличием РОВ в целлюлозе, привнесенным в технологическом процессе, можно объяснить и явление образования так называемой «коричневой линии» на границе раздела вода-воздух в бумаге, помещенной в воду [4].

Заключение

Проведенный анализ позволяет заключить, что спектры флуоресценции бумаги не обусловлены свечением целлюлозы, а являются свечением различных примесей, остающихся в целлюлозе в процессе ее изготовления из исходного сырья.

Литература

1. Методические указания по оценке состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по степени полимеризации. Утверждены ОАО РАО "ЕЭС России" 13.12.2007.
2. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Transformer State Diagnosis in Optical Spectra of Transformer Oils // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, Iss.14. P. 3042–3046.
3. Kalathiripi H., Karmakar S. Analysis of transformer oil degradation due to thermal stress using optical spectroscopic techniques. *Int Trans Electr Energ Syst*. 2017; e2346. <https://doi.org/10.1002/etep.2346>.
4. Ермоленко И.Н. Спектроскопия в химии окисленных целлюлоз. Минск: Изд-во АН БССР, 1959. 292 с.

5. Васин В.П., Долин А.П. Оценка выработанного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 2. С. 37–41.

6. Гарифуллин М.Ш. Диагностика состояния бумажной изоляции по ИК спектрам отражения и спектрам люминесценции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 57–65.

7. Гарифуллин М.Ш. Контроль состояния изоляционной бумаги маслонаполненного электрооборудования оптическими методами // Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 71-74.

8. Евсюхина К.Г., Пацаева С.В. Южаков В.И. Люминесценция органических соединений – компонентов природного растворенного органического вещества // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1998. № 4. С. 58–61.

9. Остроухова Л.А. Исследование химического состава смолы древесины лиственницы / В.А. Радулгин, В.А. Бабкин, Н.А. Онучкина, А.А. Левчук // Химия растительного сырья. 2011. № 4. С. 83–87.

10. Неверова Н.А., Левчук А.А., Медведева Е.Н., Остроухова Л.А., Онучина Н.А., Голобокова Г.М., Бабкин В.А. Исследование основных практически значимых экстрактивных веществ в ядровой древесине *L. Ariz. Cajanderi* Maug // Химия растительного сырья. 2013. № 4. С. 45–54.

11. Горшкова О.М. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды / О.М. Горшкова, С.В. Пацаева, Е.В. Федосеева, Д.М. Шубина, В.И. Южаков // Вода: Химия и экология. 2009. № 11. С. 31–37.

12. Акулова О.Б., Букатый В.И., Попов К.П. Содержание растворённого органического вещества в водоёмах разного трофического уровня // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (149). С. 100–106.

Авторы публикации

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гарифуллин Марсель Шарифьянович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сабитов Айдар Хайдарович – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гиниатуллин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета.

References

1. Methodical instructions for assessing the paper insulation condition of windings of power transformers and shunt reactors by the degree of polymerization. Approved by RAO UES of Russia on 13.12.2007.

2. Kozlov V.K., Garifullin M.Sh. Transformer State Diagnosis in Optical Spectra of Transformer Oils // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, Iss.14. P. 3042–3046.

3. Kalathiripi H., Karmakar S. Analysis of transformer oil degradation due to thermal stress using optical spectroscopic techniques. *Int Trans Electr Energ Syst*. 2017; e2346. <https://doi.org/10.1002/etep.2346>.

4. Ermolenko I.N. Spectroscopy in the chemistry of oxidized celluloses. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1959. 292 p.

5. Vasin V.P., Dolin A.P. Estimation of the spent resource of the isolation of power oil-filled transformers // ELEKTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry. 2009. № 2. P. 37–41.
6. Garifullin M.Sh. Diagnosis of the state of paper insulation by IR reflection spectra and luminescence spectra // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2013. № 5-6. P. 57–65.
7. Garifullin M.Sh. Condition monitoring insulating paper of oil-filled electrical equipment by optical methods // Control. Diagnostics. 2013. No. 12. P. 71–74.
8. Evsyukhina K.G., Patsaeva S.V. Yuzhakov V.I. Luminescence of organic compounds - components of natural dissolved organic matter // Vestn. Moscow. University. Series 3. Physics. Astronomy. 1998. № 4. P. 58–61.
9. Ostroukhova L.A. Investigation of the chemical composition of the resin of larch wood / B.A. Radulgin, V.A. Babkin, N.A. Onuchkina, A.A. Levchuk // Chemistry of plant raw materials. 2011. № 4. P. 83–87.
10. Neverova N.A., Levchuk A.A., Medvedeva E.N., Ostroukhova L.A., Onuchina N.A., Golobokova G.M., Babkin V.A. Investigation of the main practically significant extractive substances in the wood of the nucleus L Ariz Cajanderi Mayr // Chemistry of plant raw materials. 2013. № 4. P. 45–54.
11. Gorshkova O.M. Fluorescence of dissolved organic matter of natural water / Gorshkova O.M., Patsaeva S.V., Fedoseeva E.V., Shubina D.M., Yuzhakov V.I. // Water: Chemistry and Ecology. 2009. № 11. P. 31–37.
12. Akulova O.B., Bukaty V.I., Popov K.P. The content of dissolved organic matter in water bodies of different trophic level // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2017. No. 3 (149). P. 100–106.

Authors of the publication

Vladimir K. Kozlov – Grand PhD in Physico-mathematical sciences, Professor of the department «Electric power systems and networks», Kazan State Power Engineering University.

Marsel S. Garifullin – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the department «Electric power systems and networks», Kazan State Power Engineering University.

Aydar Kh. Sabitov – Senior lecturer of the department «Electric power systems and networks», Kazan State Power Engineering University.

Ruslan A. Gianiatullin – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of «Electric Drive and Electrical Engineering», Kazan National Research Technological University.

Поступила в редакцию

10 сентября 2018 г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 535.34.083.2

МИНИМИЗАЦИЯ ОШИБОК ЭКСПЕРИМЕНТА В МЕТОДЕ ПМР И ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКТРА ВРЕМЕН РЕЛАКСАЦИИ

Р.С. Кашаев, А. Ю. Свинин, О.В. Козелков

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: Произведена оценка ошибок в зависимости от этапов процесса измерения методом протонной магнитно-резонансной релаксации (ПМРР) с целью получения параметров спин-спиновой T_{2i} релаксации и значений A_{2i} , соответствующих им относительных амплитуд огибающих спин-эхо. Оценены возможности применения алгоритма обратного преобразования Лапласа (L^{-1}), реализованного в программе UpenWin, для получения спектра времен релаксации, минимизации ошибок и облегчения интерпретации полученных данных кинетической кривой релаксационного процесса ПМР.

Ключевые слов: ошибка, протонная релаксации, обратное преобразование Лапласа, спектр времен релаксации.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-152-160.

Для цитирования: Кашаев Р.С., Свинин А. Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 152-160. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-152-160.

MINIMIZATION OF EXPERIMENT ERRORS IN THE METHOD OF PMR AND OPPORTUNITIES FOR RECEIVING OF RELAXATION TIMES SPECTRA

P.S. Kashaev, A.Yu. Svinin, O.V. Kozelkov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: Made an appreciation of measurements errors in method of proton magnetic resonance relaxation (PMRR) for receiving of values of spin-spin relaxation times T_{2i} and corresponding them values A_{2i} , of relative amplitudes of spin-echo envelope. Estimates of opportunities of reverse Laplace transformation (L^{-1}) algorithm realized in UpenWin program for relaxation times

spectra determination, minimization of errors and facilitation for interpretation received data of kinetic curve PMRR relaxation process.

Key words: *error, proton relaxation, reverse Laplace transformation, relaxation times spectra.*

For citation: *P.S. Kashaev, A.Yu. Svinin, O.V. Kozelkov. Minimization of experiment errors in the method of PMR and opportunities for receiving of relaxation times spectra. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 152-160. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-152-160.*

Основные параметры о веществе и материалах, получаемые методом протонной магнитной резонансной релаксации (ПМР-релаксации - ПМРР), - значения времен спин-решеточной T_{1i} и спин-спиновой T_{2i} релаксации и значения A_{1i} и A_{2i} , соответствующие относительным амплитудам сигналов ПМР, характеризующие населенность протонов, соответствующих этим временам релаксации. При выделении этих параметров из экспериментальных данных и их интерпретации исследователь сталкивается с ошибками, которые следует учитывать и, по возможности, минимизировать. По данным работы [1] доли ошибок измерений, в зависимости от этапов процесса измерения, возникают и распределяются следующим образом: при подготовке пробы $\approx 38\%$, при сбоях аппаратуры и неверно подобранных методически $\approx 30\%$, при неверной калибровке прибора $\approx 23\%$, при лабораторном отборе пробы $\approx 10\%$. Рассмотрим их на примере ошибок измерений времен спин-спиновой T_{2i} релаксации и значений A_{2i} , встречающихся при использовании релаксометра ПМР на частоту 14,3 МГц, разработанного сотрудниками лаборатории кафедры «Приборостроение и мехатроника» КГЭУ [2].

Целью данной работы является оценка возможности применения алгоритма обратного преобразования Лапласа (L^{-1}), реализованного в программе *OpenWin*, для получения спектра времен релаксации, минимизации ошибок и облегчения интерпретации полученных данных кинетической кривой релаксационного процесса ПМР.

Погрешности измерений в методе ПМРР

В методе ПМР-релаксации ошибки пробоподготовки исключаются, поскольку она отсутствует, что является одним из главных преимуществ метода. Ошибки неправильной калибровки и пробоотбора минимизируются настройкой релаксометра стандартными образцами перед каждым измерением и использованием калиброванных ампул одного и того же диаметра, которые наполняются на одну и ту же высоту пробирки, соответствующую размерам катушки датчика релаксометра.

Поэтому основное внимание следует уделить аппаратурным погрешностям измерений, внешним факторам и погрешностям обработки экспериментальных данных.

Погрешность *воспроизводимости* сигнала γ_B определяется уравнением

$$\gamma_B = \frac{\Delta_{\text{куMax}} 100\%}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{мин}}} = \frac{\Delta_{\text{куMax}} 100\%}{Nq} = \frac{100\%}{2N}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{куMax}}$ – абсолютная погрешность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), $N = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{мин}}$ – число квантования. При использовании 8-разрядного АЦП $\gamma_B = 100\%/2 \cdot 256 = \pm 0,2\%$. Амплитудный детектор имеет линейность $> 40\text{Дб}$ и обеспечивает линейность измерений в до $N = \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{мин}} = 2^8 = 256$.

Погрешности внешних факторов

Погрешность γ_d вызвана изменением ν (кГц) поля магнита от изменения температуры внешней среды. Она устраняется термостатированием магнита с образцом в устройстве, описанном в патенте РФ №136143 [3].

Погрешность от неоднородности радиочастотного (РЧ) поля H_1 сводится к минимуму использованием рулонной катушки датчика с особым профилем наматываемой полосы, и составляет $\delta H_1 < 2\%$ в 75% объема образца.

Погрешность от нестабильности РЧ-поля по тестовым измерениям H_1 не превышает $\pm 0,3\%$. Стабильность длительностей импульсов автоматически обеспечивается фиксированными уровнями напряжений цифровых микросхем.

Стабильность питающих напряжений составляет $\pm 0,2\%$.

Таким образом, суммарная погрешность от внешних факторов составляет $\gamma_d \approx \pm 0,9\%$.

Стабильность температуры в датчиках с изменяемой температурой поддерживается с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$, т.е. *систематическая* погрешность составляет $\gamma_c = \pm 0,25\%$.

Погрешности обработки данных

Погрешность измерений времен релаксации $\Delta T_2/T_2$ можно оценить по формуле для скоростей релаксации $(T_2)^{-1}$:

$$(T_2)^{-1} = (T_2^*)^{-1} + (T_{2\text{ест}})^{-1}, \quad (2)$$

где $(T_2^*)^{-1} = \gamma \delta H / 2\pi$ – вклад, обусловленный неоднородностью магнитного поля; $(T_{2\text{ест}})^{-1}$ – вклад от естественных релаксационных процессов (диполь-дипольных, скалярных, диффузионных взаимодействий и др.). В нашем случае неоднородность внешнего магнитного поля $\delta H/H_0 \approx 10^{-4}$, следовательно в диапазоне резонансных частот 6 – 14 МГц $(T_2^*)^{-1} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. То есть ошибка измерений составляет $\Delta T_2/T_2 \approx \pm 1\%$.

Доверительная вероятность P_d измерений обычно принимается $P_d=0,9$. Тогда погрешности обработки измерения будут описываться уравнением

$$\gamma_i = \gamma_{i \text{ ср}} \pm 1,6\sigma_i. \quad (3)$$

Здесь $k_i = 1,6$ – квантиль, соответствующий $P_d=0,9$, а σ_i – среднееквадратическое отклонение (СКО) или выборочная дисперсия при суммировании до n – числа накоплений:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{[1/(n-1)]} \left\{ \sum y_i^2 - (1/n) [\sum y_i]^2 \right\}. \quad (4)$$

Точность измерения растет с числом накоплений в $\sqrt{n}$ раз, поэтому при измерениях стараются использовать максимальное n до $n = 100$, что незначительно увеличивает время измерения (не более 1–2 минут).

Таким образом, суммарная погрешность измерений составляет $\gamma_a = \approx \pm 2,4\%$.

Методика разделения огибающей спин-эхо на экспоненциальные компоненты

Зависимости огибающей амплитуд A_e спин-эхо при измерениях времен спин-спиновой релаксации T_{2i} (где $i = A, B, C$ – индекс, обозначающий три протонные фазы с временами релаксации T_{1i} и T_{2i}) по методике Карра-Парселла-Мейбум-Гилла КПМГ, см. [4] после амплитудного детектирования для жидкой фазы, намагниченность обычно описывается уравнением $M(t)/M(0) = \exp\{-nt_e/T_2\}$ или в относительных единицах амплитуд спин-эхо (СЕ) A_e :

$$A_e = \sum_{i=A, B, C} A_{0i} \exp(-t/T_{2i}) \quad (5)$$

где A_{0i} в долях от единицы соответствует относительному числу протонов фаз разной степени упорядоченности, а T_{2i} – временам релаксации этих протонных фаз $i = A, B, C$.

Стандартный метод разделения огибающей СЕ на компоненты включает построение логарифмов амплитуд СЕ в зависимости от времени измерения. Тогда для каждой компоненты со временем релаксации T_{2i} и амплитудой A_i будет выполняться соотношение

$$\ln(A_i/A_0) = -t/T_{2i} + \ln A_i. \quad (6)$$

Последовательным вычитанием из экспериментальных точек теоретических прямых, начиная с наиболее длинновременной экспоненциальной компоненты, последовательно получают амплитуды A_{0i} протонных фаз и времена релаксации T_{2i} , за которые принимается время, в течение которого амплитуда A_i сигнала СЕ уменьшается в e раз. При различии T_{2i}

в 4–5 раз, в соответствии с исследованиями Чижик [5], огибающую сигналов спин-эхо можно уверенно расщеплять на две и три компоненты.

При графоаналитическом анализе на экране осциллографа огибающая СЕ, ее логарифмы и ее разложение на экспоненциальные компоненты при измерениях времен T_{2i} по методике Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) [4], выглядят как на рис.1. Полученные параметры высвечиваются в нижней центральной части экрана.

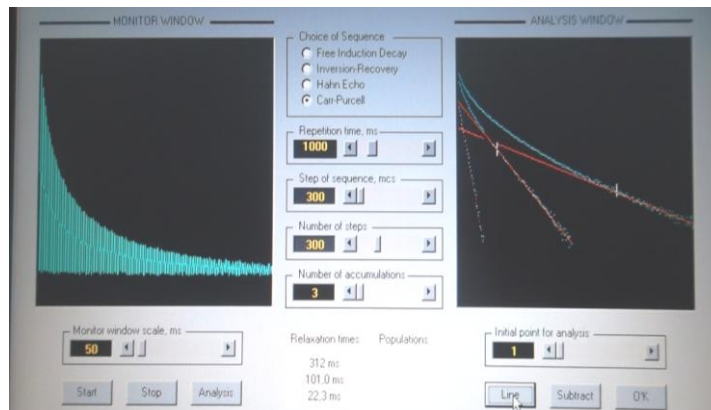


Рис.1. Огибающая СЕ (в левой части экрана) и ее разложение на экспоненциальные компоненты (правая часть экрана) при измерениях времен спин-спиновой релаксации T_{2i} по методике Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ)

Анализ возможностей использования обратного преобразования Лапласа для получения спектров времен релаксации

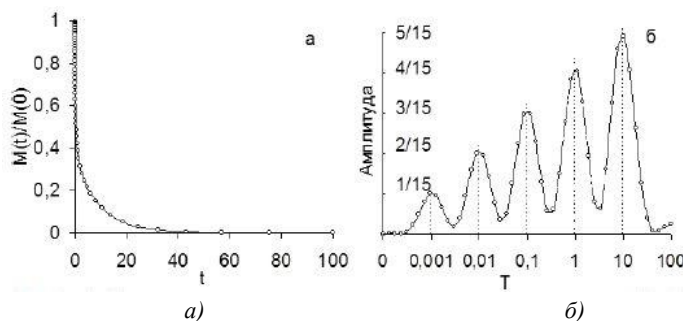


Рис. 2. *а* – Модельная кинетическая кривая огибающей спин-эхо, *б*– спектр времен релаксации, задаваемый суммой пяти экспонент, полученный путём применения обратного преобразования Лапласа к уравнению (9)

В последние декады исследователи за рубежом при анализе продукции скважин [6] и распределения пор в кернах [7] используют спектры времен релаксации, получаемые с помощью компьютерных программ *Contin*, *Dasha*, *Upen* обратного преобразования Лапласа [8] для получения спектров времен релаксации T_2 . Они достаточно удобны, но требуют тщательного выбора числа точек, алгоритмов, интервалов поиска, начальных условий и других параметров. Это связано с тем, что затухание $f(t)$ намагниченности в многофазных системах, имеет «многоэкспоненциальную» форму, описываемое формулой, включающую зависимость времен релаксации $P(T_{2i})$:

$$f(t) = \int P(T_{2i}) \exp(-t/T_{2i}) dT_{2i}. \quad (7)$$

Существует ряд математических алгоритмов описания многоэкспоненциального сигнала огибающей СЕ. Но поскольку увеличение числа экспонент дает неустойчивое решение, на практике выделяют не более трех экспонент, что целесообразно, если заранее

известно, что сигнал является двухфазным (напр. «сырая» нефть, состоящая из воды и нефти) и реже – трехфазным (напр. нефть, содержащая легкие (алкановые и нафтеновые), средние (дизельные) и тяжелые (мазутные) фракции).

Расшифровка кривой релаксации намагниченности с математической точки зрения сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} P(T_2) \exp(-t/T_2) dT_2 = A(t), \quad (8)$$

т.е. к нахождению распределения времен релаксации $P(T_2)$. Здесь $T_{2\max}$ и $T_{2\min}$ – максимальное и минимальное время релаксации. Задача характеризуется тем, что малые изменения исходных данных могут приводить к большим изменениям решений.

Одним из чаще всего используемых анализов полиэкспонент является математическая инверсия. Система n уравнений, предложенная в работе [9] описывает отдельные сигналы спин-эхо. В ней предполагается, что распределение T_2 состоит из m отдельных времен релаксации T_{2i} с соответствующими компонентами ϕ_i . Инкременты значений T_{2i} задаются заранее с логарифмическим интервалом по степени числа 2 (напр. 0.5, 1, 2, 4, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024...). Обычно необходимо 30-50 интервалов. Существуют методы инверсии, позволяющие решить уравнения данного типа. Сложность данной ситуации в том, что задача относится к классу «некорректно поставленных», т.е. задач, имеющих множество решений. Решение (8) заменой интегральной формы $f(t)$ на дискретную неадекватно, и в зависимости-решении невозможно получить линию, ширина которой на полувысоте ΔT_2 меньше 0,5 dec, а линия шириной $\Delta T_2 > 0,5$ dec может соответствовать набору узких линий.

Важно задать пределы – интервалы поиска решения. При задании интервала левая граница всегда постоянна и минимальное время определяется раздвижкой τ_0 между импульсами, которая, как правило, является постоянной для конкретного релаксометра аппаратуры. Правая граница – величина непостоянная и меняется в зависимости от объекта анализа. В нашем случае анализа $T_{2\min}$ равно времени парализации и составляет $T_{2\min} = 20$ мкс. Время $T_{2\max}$ не превышает 2.2 сек для воды.

При достаточном числе экспериментальных точек обратным преобразованием Лапласа L^{-1} временную зависимость сигнала (функцию $\exp(-t/T_{2i})$) можно преобразовать в дельта-функцию $\delta(t-T_{2i})$ [6] по формуле $L^{-1}[\sum P_i \exp(-t/T_{2i})] = \sum P_i \delta(t - T_{2i})$. Тем самым может быть оценено распределение (спектр) времен релаксации $P_i(T_{2i})$. Одним из достоинств подхода является отсутствие необходимости задания числа релаксационных компонент. **Проверка правильности построения спектра времен релаксации обратным преобразованием Лапласа L^{-1}**

Для проверки правильности работы алгоритма построения спектра построен спектр от модельной кинетической кривой [7], заданной суммой пяти экспонент (9):

$$M(t) = M_0 \left(\frac{1}{15} e^{-\frac{t}{0.001}} + \frac{2}{15} e^{-\frac{t}{0.01}} + \frac{3}{15} e^{-\frac{t}{0.1}} + \frac{4}{15} e^{-\frac{t}{1}} + \frac{5}{15} e^{-\frac{t}{10}} \right) \quad (9)$$

При правильно настроенном алгоритме построения спектра из огибающей сигналов спин-эхо на рис. 2, а должен получиться спектр на рис. 2, б.

Применим к цифровым данным кривой рис. 2, а программу *UpenWin*. Большое влияние на построение спектра оказывают параметры *MI* и *HiXtrap*, описание которых будет дано далее. То, что параметр *HiXtrap* нужно увеличить или уменьшить, можно понять эмпирическим путём в процессе построения спектра со стандартными настройками *UpenWin*: в определенный момент спектр будет отображать всю информацию о процессе, но далее программа выдаст критическую ошибку ввиду невозможности дальнейшего построения спектра или выдаст спектр, не несущий никакой информации (рис. 3). В ходе

построения данного модельного спектра возникла необходимость уменьшить данный параметр с 4 до 2.

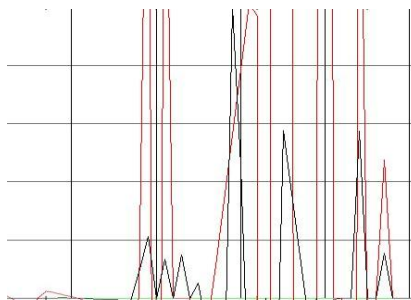


Рис.3. Пример нежелательного построения спектра

Упомянутый выше параметр MI , в свою очередь, позволяет получить, при его увеличении, более «гладкий» спектр. Однако чрезмерное увеличение данного параметра также увеличивает и количество информации, которую необходимо обработать. В качестве наглядного примера можно задать значение данного параметра равным 180 (рис. 4).

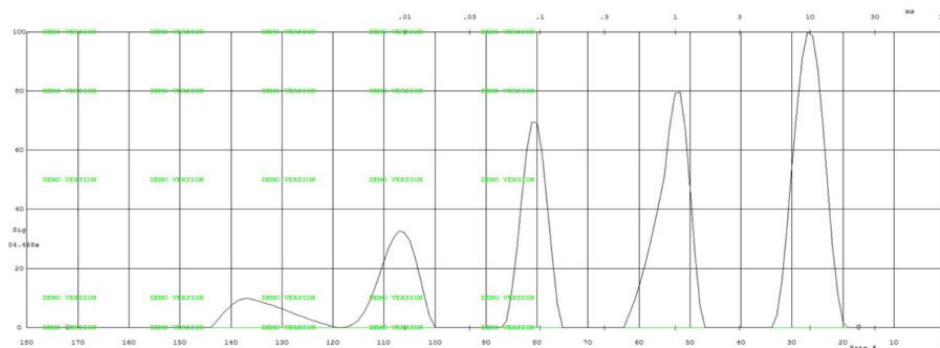


Рис. 4. Спектр временной релаксации с параметром $MI = 180$

Для проверки получения спектра времен релаксации от двухфазных образцов использована двухкомпонентная (из данных графоаналитического метода) кривая на рис. 5.

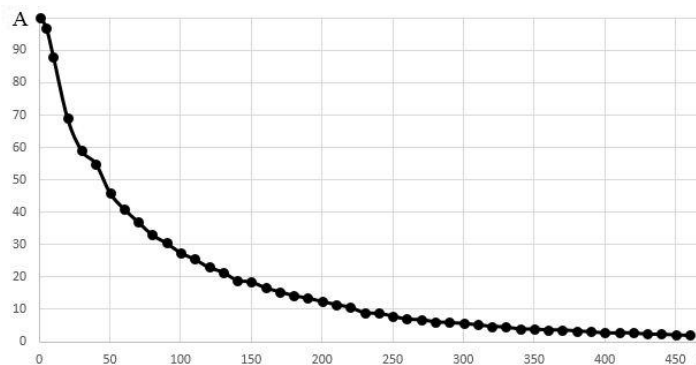


Рис. 5. Экспериментальная кинетическая кривая для двухфазной легкой нефти

Для обратного преобразования Лапласа L^{-1} количество точек взято 48. Это практически оптимальное количество, и дальнейшее их увеличение не приведёт к существенному улучшению спектра. Для того, чтобы произвести обратное преобразование Лапласа с помощью *OpenWin*, необходимо создать текстовый файл в формате 001, а затем

использовать специальную функцию **T_2 Filter** (для данных, полученных последовательностью *CPMG* [4]. В результате получается рабочий файл формата * .

Главной задачей является точное построение плавного спектра, который даст наибольшее количество информации об исследуемом процессе. Эмпирическим путём было установлено, что стандартные настройки *UpemWin* не дают в полной мере точного представления о протекаемом процессе, т.к. параметр **MI** (количество логарифмически разнесённых выходных времен релаксации, для которых вычисляется распределение времён релаксации) слишком мал (100). Дальнейшее увеличение данного параметра не даёт ощутимого эффекта для спектра до тех пор, пока не будет изменён параметр ***HiXtrap*** (соотношение последняя расчётная точка времени/последняя точка времени). То, что данный параметр необходимо увеличить, можно увидеть в ходе построения спектра со стандартными настройками, когда до окончания построения видны все точки экстремума, а в конце часть из них исчезает, превращая спектр в бессмысленный набор пиков, как на рис. 6. После уменьшения данного параметра с 4,0 до 0,2 и увеличения параметра **MI** со 100 до 245 программа выдаёт следующий спектр: B01, на котором уже применяется преобразование.

Построение данного спектра занимает более полутора минут. Сравнение полученных данных времен релаксации и амплитуд с графоаналитическим методом анализа даёт удовлетворительное совпадение в пределах $\pm 3\%$.

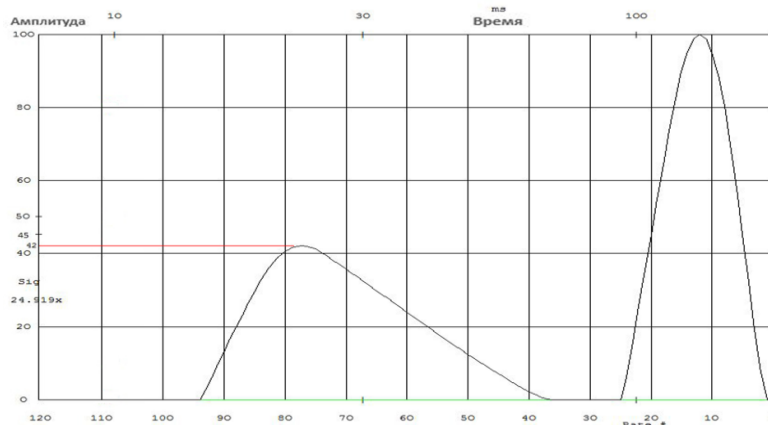


Рис. 6. Спектр времён релаксации кинетической кривой

Заключение

1. Сделан анализ возможных ошибок эксперимента при использовании созданного в лаборатории кафедры ПМ релаксметра ПМР на резонансную частоту $\nu_0 = 9.2$ МГц.
2. Построены спектры времен релаксации обратным преобразованием Лапласа L^{-1} на модельной и экспериментальной кинетических кривых и отработаны методы настройки параметров преобразования.
3. Сравнение полученных данных L^{-1} с графоаналитическим методом анализа кинетических кривых релаксации дал удовлетворительные результаты.

Литература

1. Analytical Methods Committee, AMCTB No 56. [What causes most errors in chemical analysis? Analytical Methods. 2013, 5, 2914-1915. DOI: 1.1039/C3AY90035E, pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2013.
2. Kashaev R.S. Correlation between viscosity and nuclear (proton) magnetic relaxation in oil disperse systems // Applied Magnetic Resonance, 2018, №49, p.309–325. <https://doi.org/10.1007/s00723-018-0977-2>.

3. Патент РФ №136143, МПК F28D 1/00. Устройство термостатирования магнита с образцом// Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н.; заявитель и патентообладатель КГЭУ. № 2013143081/28; заявл. 23.09.2013; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.
4. Deng F., Tao E., Kong L., Zhang X., Liu X., Geng D. On-line NMR flowing Fluid Measurements, Appl. Magn. Res. 2016, 47, 11, 1239–1253.
5. Чижик В.И. Квантовая радиофизика : учеб. пособие. С.-Пб.: Изд. С.-Пб. университета, 2004. -689 с.
6. Zaleskiy S.S., Daniele E., Blumich B., Ananikov V.P. Miniaturization of NMR systems. Chem. Rev. 2014, 114, 5641-5694. Dx.doi.org/10.1021/cr400063gi.
7. C.Lu, Z.Heidari // 2014 International Petroleum Technology Conference. Session 23 (EAGE, 2014).
8. Ge X., Fan Y., Cao Y., Xu Y., Liu X., Chen Y// Applied Magnetic Resonance, 2014, №2, P.155-167.
9. Coats G.R., Xiao L., Prammer M.G. NMR Logging Principles and Applications.// 1999 Houston: Halliburton Energy Services, P. 335.
10. Перепухов А.М., Шестаков С.Л. Алгоритм обратного преобразования Лапласа для обработки сложных релаксационных зависимостей // Труды МФТИ. 2010. Том 2, № 2. С.36–37.

Авторы публикации

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Свинин Андрей Юрьевич – магистрант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Analytical Methods Committee, AMCTB No 56. [What causes most errors in chemical analysis? Analytical Methods. 2013, 5, 2914-1915. DOI: 1.1039/C3AY90035E, pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2013.
2. Kashaev R.S. Correlation between viscosity and nuclear (proton) magnetic relaxation in oil disperse systems // Applied Magnetic Resonance, 2018. N 49. P.309–325. <https://doi.org/10.1007/s00723-018-0977-2>.
3. Patent RF №136143, МПК F28D 1/00. Ustroistvo dlya termostatirovaniya magnita s obrztsom // Kashaev R.S., Masiab A.G.N.; zayavitel I patentoobladatel KGEU. № 2013143081/28; zayavl. 23.09.2013; opubl. 27.12.2013, Biul. N 36.
4. F.Deng, E.Tao, L.Kong, X.Zhang, X.Liu, D.Geng On-line NMR flowing Fluid Measurements, Appl. Magn. Res. 2016, 47, 11, 1239–1253
5. Chizhik V.I. Kvantovaya radiofizika. Uch. Posobie. Izd. S.Pb universiteta, 2004. 689 s.
6. Zaleskiy S.S., Daniele E., Blumich B., Ananikov V.P. Miniaturization of NMR systems. Chem. Rev. 2014, 114, 5641-5694. Dx.doi.org/10.1021/cr400063gi.
7. C.Lu, Z.Heidari // 2014 International Petroleum Technology Conference. Session 23 (EAGE, 2014).
8. Ge X., Fan Y., Cao Y., Xu Y., Liu X., Chen Y// Applied Magnetic Resonance, 2014, №2, P.155-167.
9. Coats G.R., Xiao L., Prammer M.G. NMR Logging Principles and Applications.// 1999 Houston: Halliburton Energy Services, P. 335.

10. Perepukhov A.M., Shestakov S.L. Algoritm obratnogo preobrazovaniya Laplasya dlya obrabotki relaksatsionnykh zavisimostey // Trudy MFTI. 2010. Vol. 2, N 2. P. 36–37.

Authors of publication

Rustem S. Kashaev – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey U. Svinin– Master's degree courses Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Kozelkov– PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Head of Department Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

29 июля 2018 г.

ФИЗИКА



УДК 532.517.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ С ТРЕХЗАХОДНЫМИ ШНЕКОВЫМИ ВСТАВКАМИ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ ПЕКЛЕ

И.А. Конахина¹, Э. М. Хуснутдинова¹, А.И.Кадыров², Е.К.Вачагина²

¹ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

² ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

rr-088@mail.ru

Резюме: В работе представлены математическая модель и результаты численных исследований теплообмена при ламинарных течениях вязких жидкостей в каналах с трехзаходными шнековыми вставками, которые широко распространены на практике в качестве интенсификаторов конвективного теплообмена.

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, шнековые вставки, винтовая система координат.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-161-169.

Для цитирования: Конахина И.А., Хуснутдинова Э.М., Кадыров А.И., Вачагина Е.К. Теплообмен при ламинарных течениях вязкой жидкости в каналах с трехзаходными шнековыми вставками при больших числах Пекле // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. Т. 20. № 11-12. С. 161-169. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-161-169.

HEAT TRANSFER FOR LAMINAR VISCOUS FLOWS IN A TUBE FITTED WITH TRIPLE TWISTED FINS ON ROD UNDER LARGE PECLET NUMBERS

I.A. Konakhina¹, E.M. Khusnutdinova¹, A.I. Kadyirov², E.K. Vachagina²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia

rr-088@mail.ru

Abstract: The mathematical model and the numerical results of the heat transfer in laminar viscous flows in a tube fitted with triple twisted fins on a rod is obtained. The tubes fitted with triple twisted fins on a rod are widely used for heat transfer enhancement.

Keywords: hydrodynamics, heat exchange, screw inserts, helical coordinate system.

For citation: I.A. Konakhina, E.M. Khusnutdinova, A.I. Kadyirov, E.K. Vachagina. Heat transfer for laminar viscous flows in a tube fitted with triple twisted fins on rod under large Peclet

Введение

Как известно, винтовая закрутка потока жидкости по всей длине канала является одним из пассивных методов интенсификации теплоотдачи при течении вязких жидкостей в каналах теплообменного оборудования [1–6]. В случаях, когда не допускается сильное повышение гидравлического сопротивления канала для интенсификации теплообмена, используется метод разрушения пристенных слоев жидкости с помощью нанесения винтовой накатки [3] или использование коротких закручивающих устройств [6]. Однако для высоковязких жидкостей, для которых характерен ламинарный режим течения, эффект от действия винтовой накатки или коротких закручивающих устройств невелик. В таких случаях и когда допускается увеличение гидравлического сопротивления каналов используется закрутка всего потока жидкости. В качестве устройств, обеспечивающих закрутку всего потока жидкости, а не только ее пристенных слоев, наиболее часто используются винтовые ленточные и шнековые вставки. Исследованию применения ленточных вставок для интенсификации теплообмена посвящено большое количество работ [5]. Однако очевидно, что процессы переноса тепла в каналах с ленточными вставками менее эффективны, чем в каналах со шнековыми вставками. Площадь поверхности теплообмена, приходящаяся на единицу длины канала, в первом случае меньше, чем во втором. Работ, посвященных процессам переноса тепла в каналах со шнековыми вставками, несколько меньше, причем почти все они рассматривают однозаходные шнековые вставки [1, 4, 6]. При этом очевидно, что влияние закручивания потока на процессы переноса тепла в каналах с однозаходной шнековой вставкой меньше, чем в каналах с двузаходной или трехзаходной вставками: чем больше число ходов, тем интенсивнее происходят процессы переноса тепла. С другой стороны, при увеличении числа ходов возрастает гидравлическое сопротивление каналов. Таким образом, в случаях, когда запасы мощности на прокачку жидкости достаточны для обеспечения повышенного гидравлического сопротивления канала, использование трехзаходной шнековой вставки позволит достичь большей эффективности по сравнению с однозаходной шнековой вставкой. Этот факт диктует целесообразность исследования процессов переноса тепла в каналах с трехзаходными шнековыми вставками.

Постановка задачи

Рассматривается теплоперенос при стационарном ламинарном течении вязкой ньютоновской жидкости в канале с трехзаходной шнековой вставкой (рис. 1). Исследуемый канал имеет три равнозначные области, в связи с чем в качестве расчетной области рассмотрена одна из них. В оставшихся двух областях распределения скоростей и температур будут идентичными.

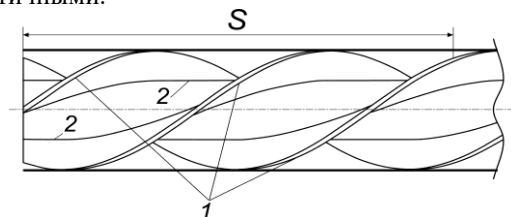


Рис. 1. Продольное сечение канала с трехзаходной шнековой вставкой: S – шаг винтового канала (длина части канала, соответствующая повороту ребер шнека на 360 градусов); 1 – ребра трехзаходной шнековой вставки; 2 – внутренняя труба

В качестве основных допущений при постановке задачи принято: теплофизические характеристики (плотность ρ_f , коэффициент теплопроводности λ_f , удельная теплоемкость c_f и динамическая вязкость μ_f) жидкости в рассматриваемом диапазоне температур меняются незначительно и могут быть приняты постоянными. Силы тяжести пренебрежимо малы, перенос тепла за счет теплопроводности в осевом направлении много меньше, чем в поперечных направлениях, и меньше конвективного переноса тепла как в осевом, так и в поперечных направлениях. На входе в канал задан сформировавшийся профиль скорости, на стенках канала принято условие прилипания жидкости. На границах канала поддерживается постоянное значение температуры.

Канал с трехзаходной шнековой вставкой обладает винтовой симметрией. Данное свойство позволяет ввести специальную винтовую систему координат [1–3], переменные которой η^1, η^2, η^3 связаны с переменными декартовой системы координат соотношениями

$$\begin{cases} x = R\eta^1 \cos(\eta^2 \pm \kappa\eta^3) \\ y = R\eta^1 \sin(\eta^2 \pm \kappa\eta^3) \\ z = R\eta^3 \end{cases} \quad (1)$$

где $\kappa = 2\pi R / S$, R – больший радиус канала с трехзаходной шнековой вставкой; S – шаг винтового канала; $z = R\eta^3$ – ось канала. В (1) знак "+" выбирается для канала, винтовые ребра которого закручены по часовой стрелке, а знак "-" – для канала, винтовые ребра которого закручены против часовой стрелки.

Система уравнений, описывающая процессы гидродинамики и теплообмена при сделанных допущениях принимает вид

$$\begin{aligned} \text{Re}_R \left(\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^1}{\partial \eta^2} v^2 - \eta^1 v^2 v^2 \pm 2\kappa \eta^1 v^2 v^3 - \kappa^2 \eta^1 v^3 v^3 \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_1^2}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\eta^1} s_2^2 \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^3 + \frac{1}{\eta^1} s_1^1, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_R (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \right) + \\ \text{Re}_R (\eta^1)^2 \left(\mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \mp \kappa \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^2} + \frac{\partial s_2^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_2^2}{\partial \eta^2} + \eta^1 s_1^2 \mp \kappa \eta^1 s_1^3, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_R \left(\mp \kappa (\eta^1)^2 \left(\frac{\partial v^2}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} v^2 + \frac{2}{\eta^1} v^1 v^2 \mp \frac{2\kappa}{\eta^1} v^1 v^3 \right) \right) + \\ + \text{Re}_R \left(\left(1 + \kappa^2 (\eta^1)^2 \right) \left(\frac{\partial v^3}{\partial \eta^1} v^1 + \frac{\partial v^3}{\partial \eta^2} v^2 \right) \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial \eta^3} + \frac{\partial s_3^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial s_3^2}{\partial \eta^2} \pm \frac{\kappa}{\eta^1} s_2^1 \mp \kappa \eta^1 s_1^2 + \kappa^2 \eta^1 s_1^3 + \frac{1}{\eta^1} s_3^1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v^1}{\partial \eta^1} + \frac{\partial v^2}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta^1} v^1 = 0,$$

$$\text{Pe}_R \left(v^1 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^1} + v^2 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^2} + v^3 \frac{\partial \theta}{\partial \eta^3} \right) = \frac{\partial^2 \theta}{\partial (\eta^1)^2} + \frac{\partial}{\partial \eta^2} \left(\frac{1 + \kappa^2 (\eta^1)^2}{(\eta^1)^2} \frac{\partial \theta}{\partial \eta^2} \right) + \frac{1}{\eta^1} \frac{\partial \theta}{\partial \eta^1}, \quad (5)$$

где $\text{Re}_R = \rho_f V_a R / \mu_f$ – модифицированное число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости $V_a = Q / \Omega$ и радиусу канала: Q – объемный расход жидкости; Ω – площадь поперечного сечения; $v^i = V^i / V_a$ ($i = 1, 2, 3$) – безразмерные контравариантные компоненты безразмерной скорости; $\mathbf{v} = \mathbf{V} / V_a$; V^i ($i = 1, 2, 3$) – контравариантные компоненты скорости $\mathbf{V}$ в винтовой системе координат; $p = PR / (\mu_f V_a)$ – безразмерное давление; P – давление; $\text{Pe}_R = \rho_f c_f V_a R / \lambda_f$ – модифицированное число Пекле; $\theta = (T - T_w) / (T_0 - T_w)$ – безразмерная температура; T – температура жидкости; T_w – температура стенок канала; T_0 – температура жидкости на входе в канал; $s_i^j = (\text{grad} \mathbf{v})_i^j$ – тензор.

В качестве условий однозначности взяты следующие условия:

$$\begin{aligned} v^i(\delta, \eta^2) &= v^i(1, \eta^2) = 0, \quad (i = 1, 2, 3) \text{ при } -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, \\ v^i(\eta^1, \pm\pi/3) &= 0 \quad (i = 1, 2, 3) \text{ при } \delta \leq \eta^1 \leq 1, \\ \theta(\delta, \eta^2, \eta^3) &= \theta(1, \eta^2, \eta^3) = 0, \quad -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, 0 \leq \eta^3 < \infty, \\ \theta(\eta^1, \pm\pi/3, \eta^3) &= 0, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, 0 \leq \eta^3 < \infty, \\ \theta(\eta^1, \eta^2, 0) &= 1, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, \\ \theta(\eta^1, \eta^2, \eta^3 \rightarrow \infty) &= 0, \quad \delta \leq \eta^1 \leq 1, -\pi/3 \leq \eta^2 \leq \pi/3, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta = r / R$; r – меньший радиус канала с трехзаходной шнековой вставкой.

Компоненты скорости зависят только от двух переменных η^1 и η^2 , а безразмерное давление может быть записано как $p = f_0 \eta^3 + f_{00}(\eta^1, \eta^2)$, где $\partial p / \partial \eta^3 = f_0 = \text{const}$.

При сделанных допущениях система уравнений переноса количества движения и неразрывности решается отдельно от уравнения переноса энергии, затем полученные гидродинамические поля используются для решения уравнения переноса энергии. Для решения поставленной задачи адаптирован программный пакет "COMSOL Multiphysics", использующий метод конечных элементов. Уравнения (2)–(5) записаны в винтовой системе координат. "COMSOL Multiphysics" позволяет ввести в общую форму уравнений движения и неразрывности необходимые функции для перехода к винтовой системе координат (1).

Апробация пакета на примере решения задачи о течении вязкой жидкости в канале с однозаходной шнековой вставкой представлена в работе [2].

При обработке полученных результатов использованы традиционные числа Рейнольдса $Re_h = \rho_f V_a D_h / \mu_f$ и Пекле $Pe_h = \rho_f c_f V_a D_h / \lambda_f$, где в качестве определяющих размеров взят гидравлический диаметр D_h . Его значение для каналов с трехзаходной шнековой вставкой определено как $D_h = 4V/\Sigma$, где объем V и площадь смоченной поверхности Σ одного хода канала и одного витка канала определены следующим образом:

$$V = \pi(1 - \delta^2) R^2 S / 3,$$

$$\Sigma = RS \left[\frac{2\pi(1 + \delta)}{3} + \left(\sqrt{\kappa^2 + 1} - \delta \sqrt{\kappa^2 \delta^2 + 1} + \frac{\operatorname{arcsinh}(\kappa) - \operatorname{arcsinh}(\kappa\delta)}{\kappa} \right) \right].$$

Безразмерные среднерасходная θ_a и нормализованная $\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$ температуры вычислены по формулам:

$$\theta_a = \frac{R^2}{\Omega} \iint_{\Omega_0} \theta(\eta^1, \eta^2) u^3(\eta^1, \eta^2) \eta^1 d\eta^1 d\eta^2, \quad (8)$$

$$\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3) = \theta(\eta^1, \eta^2, \eta^3) / \theta_a(\eta^3), \quad (9)$$

где $\vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$ с увеличением расстояния от входа в канал стремится к стабилизированному распределению $\vartheta_\infty(\eta^1, \eta^2) = \lim_{\eta^3 \rightarrow \infty} \vartheta(\eta^1, \eta^2, \eta^3)$.

Локальное Nu_h и среднее $\overline{Nu}_h$ числа Нуссельта определены через среднерасходную температуру следующим образом:

$$Nu_h = Pe_h \frac{D_h}{4R} \frac{1}{\theta_a} \left| \frac{\partial \theta_a}{\partial \eta^3} \right|, \quad \overline{Nu}_h = Pe_h \frac{D_h}{4R} |\ln \theta_a|.$$

Результаты

Расчеты представлены для частного случая: геометрические размеры канала $\delta = r/R = 0,5$ и $S/D = 4$, где $D = 2R$ – больший диаметр канала с трехзаходной шнековой вставкой; для двух значений чисел Рейнольдса $Re_h = 100; 500$ и одного значения числа Пекле $Pe_h = 100$.

На рис. 2 показаны профили осевых физических составляющих вектора скорости. С ростом числа Рейнольдса картина распределения составляющих вектора скорости становится все более ассиметричной, при этом максимальные значения осевой составляющей смещаются по ходу закрутки потока.

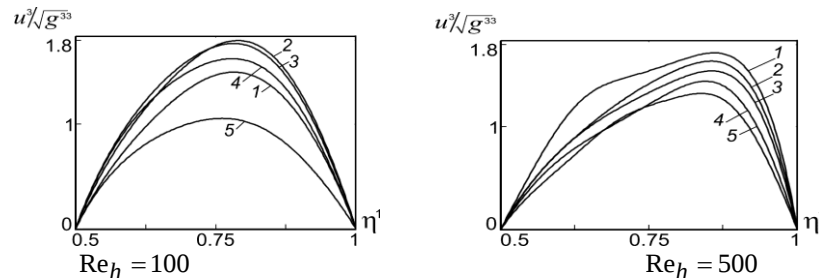


Рис.2. Профили осевых составляющих скорости вдоль прямых $\eta^2 = \text{const}$:

$$1 - \eta^2 = -\frac{4\pi}{15}; 2 - \eta^2 = -\frac{2\pi}{15}; 3 - \eta^2 = 0; 4 - \eta^2 = \frac{2\pi}{15}; 5 - \eta^2 = \frac{4\pi}{15}.$$

На рис. 3 показаны профили поперечных радиальной и тангенциальной физических составляющих вектора скорости для различных значений чисел Рейнольдса. Видно, что величины поперечных составляющих вектора скорости соизмеримы с величинами осевой составляющей, следовательно, существенно влияют на процессы переноса тепла в рассматриваемом канале.

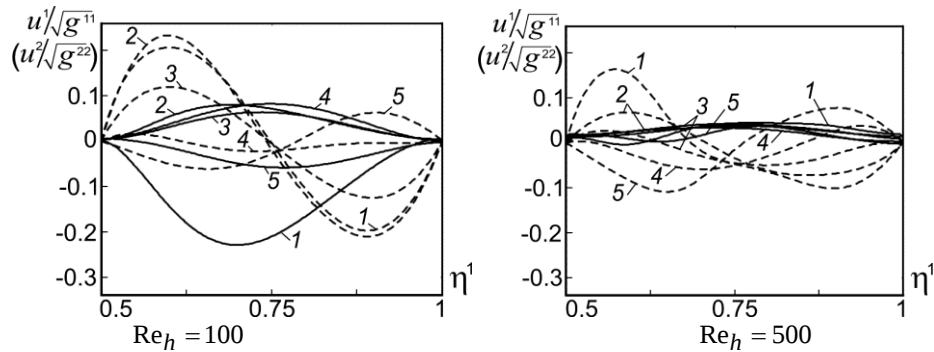


Рис. 3. Профили поперечных составляющих скорости вдоль прямых $\eta^2 = \text{const}$:

сплошная линия – радиальная составляющая $\left(u^1/\sqrt{g^{11}}\right)$; пунктирная линия –
– тангенциальная составляющая $\left(u^2/\sqrt{g^{22}}\right)$; обозначения согласно рис. 2

На рис. 4 показано распределение безразмерной среднерасходной температуры θ_a по длине канала. Видно, что с увеличением числа Рейнольдса температура жидкости приближается к температуре стенки канала на меньшем расстоянии: для $Re_h = 500$ это расстояние равно 12, а для $Re_h = 100$ равно 16.

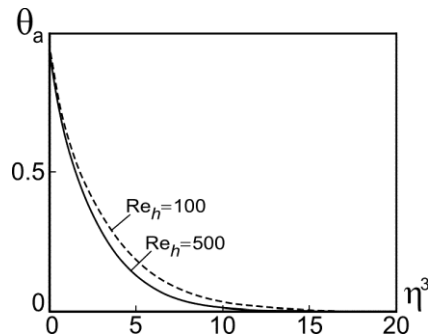


Рис.4. Распределение безразмерной среднерасходной температуры по длине канала

Распределения локальных и средних чисел Нуссельта по длине канала со шнековыми вставками характеризуются резким падением вблизи области, непосредственно прилегающей к входу в канал, затем ростом и стабилизацией (рис. 5), что качественно согласуется с результатами работы [7]. При этом локальные числа Нуссельта принимают наименьшие значения вблизи входной области канала $Nu_h = 5,51$ ($Re_h = 100$) и $Nu_h = 6,72$ ($Re_h = 500$). Увеличение числа Рейнольдса в 5 раз приводит к увеличению

стабилизированного числа Nu_h в 1,44 раза. Несмотря на характерный спад интенсивности теплообмена вблизи входной области, локальные и средние значения числа Нуссельта значительно превышают значения, соответствующие круглой трубе и плоской щели. Например, стабилизированное число Нуссельта в канале с трехзаходной шнековой вставкой при $Re_h = 500$ на 154,1% больше соответствующего значения в круглой трубе и на 23,2% больше соответствующего значения в плоской щели.

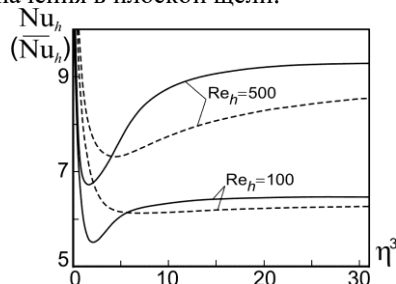


Рис.5. Распределение локального (сплошная линия) и среднего (пунктирная линия) чисел Нуссельта по длине канала

На рис 6 показаны профили безразмерной нормализованной температуры для различных чисел Рейнольдса. С ростом числа Рейнольдса область с максимальными значениями нормализованной температуры смещается к ребру шнека по ходу закрутки потока, в отличие от малых чисел Рейнольдса, где данное распределение более равномерно распределено по сечению канала. Здесь кривая 1 соответствует распределению нормализованной температуры в области, наиболее близко расположенной к ребру шнека по ходу закрутки ($\eta^2 = -(4\pi/15)$).

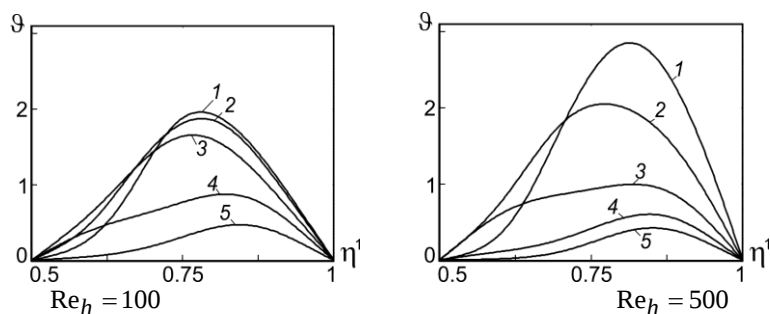


Рис.6. Профили безразмерной нормализованной температуры: обозначения согласно рис.1

Заключение

Разработана математическая модель теплопереноса при ламинарном течении вязкой жидкости в канале с трехзаходной шнековой вставкой, для записи которой использовалась винтовая система координат. Результаты численных исследований показали, что поперечные потоки существенно влияют на процессы теплопереноса в исследуемом канале. Стабилизированное число Нуссельта в канале с трехзаходной шнековой вставкой при $Re_h = 500$ на 154,1% больше соответствующего значения в круглой трубе и на 23,2% больше соответствующего значения в плоской щели. Таким образом, использование трехзаходной шнековой вставки в каналах теплообменного оборудования, использующего в качестве рабочих сред вязкие жидкости, приводит к значительному увеличению интенсивности теплообмена.

Литература

1. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1996. 304с. <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:19035/Source:default#>.
2. Vachagina E.K., Kadyirov A.I. The use of helical coordinate systems // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2014. Vol. 67, № 4. P.553–566. DOI: 10.1093/qjmam/hbu017 <https://elibrary.ru/item.asp?id=24064796>.
3. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Исследование процесса интенсификации теплообмена при ламинарном течении вязких жидкостей в трубах с винтовой накаткой // Теплоэнергетика. 1993. №11. С.59–62.
4. Кадыйров А.И., Халитова Г.Р., Вачагина Е.К. Гидродинамическая структура потока вязкой жидкости в каналах с интенсификаторами в виде шнековой вставки // Труды Академэнерго. 2016. №3. С. 7–16. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26743777>.
5. Bergles A.E., Jensen M.K., Somerscales E.F.C. and Manglik R.M. Literature Review of Heat Transfer Enhancement Technology for Heat Exchanges in Gas-Fired Applications, Report GRI 91-0146, Gas Research Institute, Chicago. 1991.
6. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями (Аналитический обзор) // ТБТ. 2003. Т. 41, №4. С.587–633. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17294932>.
7. Kadyirov A.I., Abaydullin B.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic characteristics of viscous fluid flow in screw channels formed by two ribs // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012011.
8. Mulugeta T. Sisay, Shimelis A. Emire, Hosahalli S. Ramaswamy, Tilahun S. Workneh Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twine-screw extruder // LWT - Food Science and Technology. 2017. №79. P. 213–222. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.01.015.
9. 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. P. 220–234. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.001.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1975. 488 с.

Авторы публикации

Конахина Ирина Александровна – д-р техн. наук, заместитель директора комплексного центра обучения в сфере энергоэффективности Казанского (Приволжского) федерального университета. E-mail: agronom_1958@mail.ru

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна – аспирант Казанского (Приволжского) федерального университета. E-mail: gr-088@mail.ru.

Кадыйров Айдар Ильдусович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Теплофизика и волновые технологии» Казанского научного центра Российской академии наук. E-mail: aidarik@rambler.ru.

Вачагина Екатерина Константиновна – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизика и волновые технологии» Казанского научного центра Российской академии наук. E-mail: vachaginae@mail.ru.

References

1. Nazmeev Yu.G. Hydrodynamics and heat exchange of swirled flows of rheologically complex media. M. Energoatomizdat, 1996. 304 p. <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:19035/Source:default#>.
2. Vachagina E.K., Kadyirov A.I. The use of helical coordinate systems // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2014. Vol. 67, № 4. P. 553–566. DOI: 10.1093/qjmam/hbu017 <https://elibrary.ru/item.asp?id=24064796>.
3. Nazmeev Yu.G., Konakhina I.A. Investigation of heat transfer enhancement for laminar viscous flow in pipes with helical rolling // Teploenergretika. 1993. №11. P.59–62.
4. Kadyirov A.I., Khalitova G.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic structures of viscous flow in a coaxial channel with screw inserts // Transactions of Academenergo. 2016. №3. P. 7–16. <http://elibrary.ru/item.asp?id=26743777>.
5. Bergles A.E., Jensen M.K., Somerscales E.F.C. and Manglik R.M. Literature Review of Heat Transfer Enhancement Technology for Heat Exchanges in Gas-Fired Applications, Report GRI 91-0146, Gas Research Institute, Chicago. 1991.
6. Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat transfer in swirling flows in channels with swirlers (analytical review) // High temperature. 2003. Vol. 41, №4. P. 518–559. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13435839>.
7. Kadyirov A.I., Abaydullin B.R., Vachagina E.K. Hydrodynamic characteristics of viscous fluid flow in screw channels formed by two ribs // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012011.
8. Mulugeta T. Sisay, Shimelis A. Emire, Hosahalli S. Ramaswamy, Tilahun S. Workneh Residence time distribution and flow pattern of reduced-gluten wheat-based formulations in a twine-screw extruder // LWT - Food Science and Technology. 2017. №79. P. 213–222. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.01.015.
9. 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. P. 220–234. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.001.
10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Handbook for high schools, 3rd edition, publisher. M., «Energriya», 1975. P. 488.

Authors of the publication

Irina A. Konakhina – Grand PhD in Engineering sciences Kazan Federal University, Kazan, Russia. E-mail: agronom_1958@mail.ru.

Elvira M. Khusnutdinova – PhD student Kazan Federal University, Kazan, Russia. E-mail: rr-088@mail.ru.

Aidar I. Kadyirov – PhD in Engineering sciences Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia. E-mail: aidarik@rambler.ru.

Ekaterina K. Vachagina – Grand PhD in Engineering sciences, leading researcher Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia. E-mail: vachaginae@mail.ru.

Поступила в редакцию

11 октября 2018 г.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ» В 2018 ГОДУ

ЭНЕРГЕТИКА

АМИНОВ Р.З., ГАРИЕВСКИЙ М.В. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования. № 5-6. С. 29-38.

АМИНОВ Р.З., ПОРТЯНКИН А.В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности. № 7-8. С. 10-22.

АСАНОВ М.М. Влияние положения пластин абсорбера на эффективность работы солнечного коллектора. № 5-6. С. 37-45.

БА БОРАИК А.М., УСАЧЕВ А.Е., ИЛЬДАРХАНОВ Р.Г., КУБАРЕВ А.Ю. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов. № 1-2. С. 41-53.

БАХТЕЕВ К.Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей. № 3-4. С. 36-44.

ВАГАПОВ Г.В., АБДУЛЛИН Л.И., ЧЕРНОВА Н.В., ФЕДОТОВ Е.А. Влияние параллельно работающих фидеров на "резонансные частоты" воздушной линии при однофазном замыкании на землю. № 1-2. С. 54-61.

ВАСЕВ А.Н., МИСБАХОВ Р.Ш., ЗИГАНШИНА А.И., ФЕДОТОВ В.В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок. № 11-12. С. 16-26.

ВИДИН Ю.В., КАЗАКОВ Р.В., ЗЛОБИН В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле. № 11-12. С. 93-98.

ВОЛОТКОВСКАЯ Н.С., СЕМЁНОВ А.С., ФЕДОРОВ О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей республики Саха (Якутия). № 11-12. С. 46-55.

ГЕРКУСОВ А.А., ГАБДУЛВАЛИЕВА Е.И. Экономическая коррекция плотностей тока в проводах действующих воздушных линиях 110-220 Кв. № 9-10. С. 25-33.

ГИЛЬФАНОВ К.Х., ЯКИМОВ Н.Д., МИНВАЛЕЕВ Н.Ю., ШЕШУКОВ Е.Г., БОГДАНОВА Н.В. Нестационарные трение и теплообмен в начальном участке трубопровода при сбросе тепловой нагрузки. № 5-6. С. 22-28.

ГЛУХОВ Д.А., ХАКИМЗЯНОВ Э.Ф., ТИТОВ Д.Е., УГАРОВ Г.Г., МУСТАФИН Р.Г. Анализ риска отказа линейной изоляции путем оценки поперечной проводимости воздушных линий электропередач по данным синхронизированных векторных измерений. № 11-12. С. 34-45.

ГОЛУБ И.И., ВОЙТОВ О.Н., БОЛОЕВ Е.В., СЕМЕНОВА Л.В. Выбор краткосрочной фиксированной конфигурации распределительной сети. № 9-10. С. 39-51.

ГОЛУБЦОВ Н.В., ФЕДОРОВ О.В. Эффективное управление пусконаладочными процессами на электростанции с использованием ранжирования работ. № 3-4. С. 11-22.

ГРАЧЕВА Е.И., АЛИМОВА А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях. № 11-12. С. 81-92.

ГРАЧЕВА Е.И., САДЫКОВ Р.Р., ХУСНУТДИНОВ Р.Р. Сравнительный анализ методов и погрешностей расчета потерь активной мощности в низковольтных цеховых сетях. № 9-10. С. 13-24.

ГРАЧЕВА Е.И., САФИН А.Р., САДЫКОВ Р.Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов. № 5-6. С. 13-21.

ДОНСКОЙ И.Г. Математическое моделирование газификации древесины с разложением смолистых продуктов на частицах активных компонентов. № 11-12. С. 107-117.

ИВАНОВ Е.А., КАЛАЕВ В.А., ШУМИЛИН С.А. Модернизация проточной части

главного циркуляционного насоса ГЦН 22600-87. № 7-8. С. 63-70.

КИРСАНОВ Ю.А., МАКАРУШКИН Д.В., КИРСАНОВ А.Ю. Влияние частоты переключения периодов на теплоотдачу насадки регенеративного воздухоподогревателя. № 7-8. С. 35-46.

КОЗЛОВ В.К., САБИТОВ А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов. № 9-10. С. 34-38.

КОСТИНСКИЙ С.С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкции силовых трансформаторов. № 1-2. С. 14-32.

КУЗЬМИН В.А., ЗАГРАЙ И.А., ДЕСЯТКОВ И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области. № 11-12. С. 27-33.

КУМАРИТОВ А.М., ДЗГОЕВ А.Э., ШАРИБОВ Р.Б. Анализ малой выборки экспериментальных данных при управлении газоснабжением региона. № 1-2. С. 62-69.

МАНИГОМБА Ж.А., ЧИЧИРОВА Н.Д., ГРУЗДЕВ В.Б. Перспективы использования продуктов пиролиза в дизель-генераторах промышленной группы "REGIDESO" в Республике Бурунди. № 1-2. С. 33-40.

МОСКАЛЕНКО Н.И., ДОДОВ И.Р., КАЮМОВА Г.В., ХАЕРТДИНОВА А.Р., ХАМИДУЛЛИНА М.С., ШЕШУКОВ Е.Г. Моделирование радиационных характеристик газовой фазы продуктов сгорания на базе высокотемпературных атласов параметров спектральных линий. № 11-12. С. 65-80.

ПАВЛОВ Г.И., АХМЕТШИНА А.И., САБИРЗЯНОВ А.Н., ТИХОНОВ О.А. Разработка расчетной схемы камеры сгорания для сжигания щепы старых шпал. № 1-2. С. 3-13.

ПАВЛОВ Н.В., ИВАНОВА А.Е., ПЕТРОВА Т.Н. Структурный анализ топливно-энергетического баланса республики Саха (Якутия). № 9-10. С. 3-12.

САВИНА Н.В., БОДРУГ Н.С. Оценка возможности обеспечения качества электроэнергии в части отклонения напряжения потребителями. № 11-12. С. 3-15.

САДЫКОВ М.Ф. Комплексный метод и автоматизированная многофункциональная установка для исследования ряда физических свойств перспективных материалов. № 11-12. С. 118-126.

СЕЛИВАНОВ А.А., АФАНАСЬЕВА О.В., МРАКИН А.Н., ЖАНАЕВ Г.К., КАМАЕВ А.Ю. Оптимизация рабочих параметров реакторного блока установки с твердым теплоносителем. № 7-8. С. 47-54.

СМОРЧКОВА Ю.В., АВДОНИНА Е.А., ДЕДОВ А.В. Исследование теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик перспективных тепловыделяющих сборок для реакторных установок малой мощности. № 7-8. С. 23-34.

СУСЛОВ К.В., ШУШПАНОВ И.Н., ВОРОНЦОВ Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода. № 1-2. С. 70-79.

ТАЙМАРОВ М.А., АХМЕТОВА Р.В., ИЛЬИН В.К., МАРГУЛИС С.М. Сжигание мазута в котлах при различных компоновках горелок. № 7-8. С. 55-62.

ТАЙМАРОВ М.А., АХМЕТОВА Р.В., МАРГУЛИС С.М., КАСИМОВА Л.И. Влияние кавитационной обработки на выгорание частиц мазута в топках котлов. № 9-10. С. 52-59.

ФЕТИСОВ Л.В., РОЖЕНЦОВА Н.В., БУЛАТОВ О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения. № 11-12. С. 99-106.

ХРУСТАЛЕВ В.А., СУЧКОВ В.М. Внепиковое опреснение воды на базе отборного пара энергоблоков АЭС с ВВЭР. № 3-4. С. 23-35.

ЧЕТОШНИКОВА Л.М., СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВ С.А., ГУСАРОВ Г.В. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной. № 5-6. С. 3-12.

ЮДИЦКИЙ Д.М., УСАЧЕВ А.Е. Сравнительная оценка доли ударов молний в опоры и верхний фазный провод в пролете ВЛ без молниезащитного троса. № 3-4. С. 3-10.

ЯРЫШ Р.Ф., ГАРИФУЛЛИНА А.Р., ГАРИФУЛЛИН Р.И., ЯКУНИН А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки. № 11-12. С. 56-64.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТУЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., КОЧЕВ Н.С., ПЛОТНИКОВ Л.В. Повышение надежности поршневых двигателей за счет совершенствования процесса смесеобразования. № 3-4. С. 45-53.

ГЕОРГИЕВСКАЯ Е.В. Применение механики разрушений для прогнозирования ресурса радиально-осевых гидротурбин. № 9-10. С. 71-78.

КИСЕЛЕВ В.Г., РУЗИЧ Е.Н. Диэлектрические покрытия и их влияние на защиту от коррозии наружной поверхности подземных трубопроводов. № 1-2. С. 80-89.

ЛИПАНТЬЕВ Р.Е., ТУГУБАЛИНА В.П. Влияние числа оборотов пропеллерной мешалки на скорость окисления сульфидов масляной фракции в реакторе смешения. № 9-10. С. 79-83.

НОВОСЕЛОВ В.Б., БРОДОВ Ю.М., ЛИТВИНОВ Е.В., ЛЕБЕДЕВ В.В., МИХАЙЛОВ А.Г. Повышение эффективности работы электростанций путем организации дополнительных отборов пара от паровых турбин. № 1-2. С. 90-99.

ПЛОТНИКОВ Л.В., БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., КОЧЕВ Н.С. Сравнительный анализ особенностей распыла нагретого газа и перегретой жидкости через цилиндрические каналы со срезами. № 9-10. С. 60-70.

СОСНОВСКИЙ А.Ю., МУРМАНСКИЙ Б.Е., БРОДОВ Ю.М. Современное состояние и перспективные решения по совершенствованию систем тепловых расширений паровых турбин. № 7-8. С. 71-86.

ТУГОВ А.Н., РЯБОВ Г.А., ШТЕГМАН А.В., МАЙДАНИК М.Н. Опыт освоения современных котельных установок российского производства. № 7-8. С. 87-98.

ШВЕЦОВ В.Н., ЮНУСОВ А.А. Новая энергоэффективная технология и техника электродеэмульсации нефти на основе применения композитных электродов. № 3-4. С. 54-61.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

АФАНАСЬЕВ А.Ю., РЫБУШКИН Н.А., КИЛИМАНОВ К.А. Моделирование и оптимизация по энергопотреблению гибридной силовой установки для транспортного средства. № 11-12. С. 133-143.

БАЙБАГЫСОВА Д.Ж., КАДИЕВА А.К., КАДЫРОВ ЧА., УЗАГАЛИВ З.А. Компьютерное моделирование процесса нагрева и определение расчетной нагрузки проводника при стохастическом характере изменения тока. № 3-4. С. 72-81.

БОЛЬШАНИН Г.А. Уравнения пассивного восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами. № 9-10. С. 109-119.

БУРКОВ А.Ф., ЮРИН В.Н., АВЕТИСЯН В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. № 9-10. С. 92-100.

ВАРЕНОВ А.А., ЗЕНЦОВ В.П., МАЛЁВ Н.А. Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры в инкубационной камере. № 9-10. С. 101-108.

ГРАЧЕВА Е.И., ИЛЬЯСОВ И.И., АЛИМОВА А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения энергетических предприятий. № 3-4. С. 62-71.

ДМИТРИЕВ В.Н., КИСЛИЦЫН А.Л., ДУНАЕВ Д.И. Исследование тормозных режимов асинхронного дебалансного двигателя. № 3-4. С. 82-88.

КОЗЛОВ В.К., ГАРИФУЛЛИН М.Ш., САБИТОВ А.Х., ГИНИАТУЛЛИН Р.А. Люминесцентные свойства бумажной изоляции маслонаполненных трансформаторов. № 11-12. С. 144-151.

МАЛЕВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В. Исследование и синтез модального регулятора двухмассовой электромеханической системы механизма подъема крана. № 7-8. С. 99-106.

НАУМОВ А.А. Участие населения и приравненных к нему потребителей в

регулировании графика потребления ЭЭ. № 9-10. С. 84-91.

ПЕТРОВ Т.И., САФИН А.Р., ИВШИН И.В., ЦВЕТКОВ А.Н., КОРНИЛОВ В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. № 7-8. С. 107-116.

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. № 5-6. С. 46-54.

СИДОРОВ С.Н., ГОРБАЧЕВСКИЙ Н.И., ГАВРИЛОВ Е.Н. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод линии обрезающего корда. № 3-4. С. 89-98.

MAJID ABDULHAMEED ABDULHY AL-ALI, V.YU. KORNILOV, A.G. GORODNOV Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at rumila field. № 11-12. С. 127-132.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ГАТИЯТОВ И.З., САБИТОВ Л.С. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок. № 5-6. С. 93-101.

ГАТИЯТОВ И.З., САБИТОВ Л.С., КАШАПОВ Н.Ф., ГИЛЬМАНШИН И.Р., КИЯМОВ И.К. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок. № 9-10. С. 129-137.

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А., ИВАНОВ Д.А., МАРДАНОВ Г.Д. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов. № 3-4. С. 99-107.

ГОРБУНОВА О.А., ПАВЛОВ Г.И. Разработка экспериментально- теоретической модели шумового поля энергетического оборудования ТЭС. № 5-6. С. 84-92.

ИВАНИЦКИЙ М.С. Статистическое моделирование распределения концентрации твердых частиц в атмосфере района расположения котельной, сжигающей непроектное топливо. № 3-4. С. 129-135.

ИВАНОВА В.Р., ФЕТИСОВ Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях. № 9-10. С. 120-128.

ИГНАТЬЕВ Н.И. К вопросу шумовой диагностики высоковольтного оборудования. № 1-2. С. 100-110.

КАШАЕВ Р.С., СВИНИН А.Ю., КОЗЕЛКОВ О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации. № 11-12. С. 152-160.

КИСЕЛЕВ В.Г., РУЗИЧ Е.Н., ЧУНГ Ч.В. Оптимизация объема использования коксовой засыпки в системах катодной защиты для модели анодного заземления в форме полусферы. № 5-6. С. 29-38.

КУБАРЕВ А.Ю., ЗАКИРОВА А.Б., КУБАРЕВ Ю.Г. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования. № 3-4. С. 108-115.

ЛИСИЦКИЙ К.Е. Совершенствование методов и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети. № 5-6. С. 55-66.

САДЫКОВ М.Ф. Автоматизированная многофункциональная установка для исследования, разработки и тестирования двигателя внутреннего сгорания. № 9-10. С. 138-145.

САДЫКОВ М.Ф., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., АНДРЕЕВ Н.К. Применение в системах автопилотирования транспорта аппаратно-программных комплексов эмуляции двигателя и трансмиссии. № 5-6. С. 67-74.

ТАЗЕЕВ И.Р., ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., ЗАМАЛИЕВ А.Н.

Моделирование установки для балансировки ротора в программном комплексе ANSYS. № 5-6. С. 75-83.

ФИЗИКА

АХМЕТЛАТЫЙПОВА Д.Д., ГУМЕРОВ Ф.М., ТЕЛЯКОВ Э.Ш. Эффективность использования сверхкритической экстракционной технологии при выделении оксида этилена. № 5-6. С. 102-109.

ГУБАЙДУЛЛИН Д.А., ТУКМАКОВ Д.А. Численное моделирование прохождения прямого скачка уплотнения по взвеси с неравномерной концентрацией твердых частиц. № 7-8. С. 117-123.

КИСЕЛЁВ В.Г. Тепловые машины Филиппа и Карно с точки зрения теории термодинамических потенциалов. № 9-10. С. 154-165.

КОНАХИНА И.А., ХУСНУТДИНОВА Э.М., КАДЫЙРОВ А.И., ВАЧАГИНА Е.К. Теплообмен при ламинарных течениях вязкой жидкости в каналах с трехзаходными шнековыми вставками при больших числах Пекле. № 11-12. С. 161-169.

КУЗНЕЦОВ Г.В., НУРПЕЙИС А.Е. Экспериментальное определение температур в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного термосифона. № 3-4. С. 136-144.

МЕЛЕМЕД Л.Э., ФИЛИППОВ Г.А. Обобщенная формула для скорости турбулентных и ламинарных течений в трубах. № 7-8. С. 136-146.

МОРЕНКО И.В., ВОЛКОВ Ю.А. Расчет неизотермического движения двухфазной среды с учетом сжимаемости при имплозии. № 1-2. С. 128-137.

НИКИТИН А.С., БОРИСОВ А.Н. Фазово-изотропный уголкового отражателя для волоконно-оптического преобразователя. № 5-6. С. 110-117.

ПОГОРЕЛЬЦЕВ А.И., МАТУХИН В.Л., САФОНОВА О.А., ШАРИПОВА А.Р., ИСЛАМОВА Г.Н., ШМИДТ Е.В., ШУЛЬГИН Д.А. Топологические особенности распределения электронной плотности в ковеллине: положение CuI. № 5-6. С. 118-128.

РАЗИНА А.Г., КАЗАКОВ В.А., АШМАРИН А.А., КОЧАКОВ В.Д. Исследование состава пленочной системы Pb-SE и изменений ее структуры под действием температуры. № 5-6. С. 129-140.

САЙФУЛЛИН Э.Р., НАЗАРЫЧЕВ С.А., ГАЗЕЙКИНА А.В., ВАНЬКОВ Ю.В., ЛАРИОНОВА И.В. Анализ теплотехнических характеристик углеводородного топлива при изменении его состава. № 3-4. С. 145-150.

СЕМЕНОВА Е.В., ЛАРИОНОВ В.М., ВАНЬКОВ Ю.В. Термодинамический и акустический анализ пульсационного горения твердого топлива в устройстве типа резонатора Гельмгольца. № 5-6. С. 141-147.

СЕНИЦИН А.М., ЗАЙНУЛЛИН Р.Р., УЛАНОВ В.А. Концентрационные и температурные зависимости в спектрах ЭПР зондовых центров Gd³⁺ в термоэлектрических кристаллах Pb_{1-x}Ag_xS и Pb_{1-x}Cu_xS (0 ≤ x ≤ 0,011). № 7-8. С. 124-135.

ХАЗИПОВ М.Р., САГДЕЕВ К.А., САГДЕЕВ А.А., ГАЛИМОВА А.Т., ХАЙРУТДИНОВ В.Ф., ГУМЕРОВ Ф.М. Регенерация ионообменного катализатора с использованием сверхкритического флюидного экстракционного процесса. № 1-2. С. 111-121.

ХАЛИТОВ К.Ф., НОВИКОВ В.Ф. Константы квадрупольного взаимодействия и электронное строение соединений ЭХ₃. № 1-2. С. 122-127.

ШАРИПОВ И.И., КРУГЛОВ Л.В., КРУГЛОВ В.И., ДМИТРИЕВА О.С. Разработка конструкции струйно-пленочного контактного устройства с целью интенсификации теплообмена. № 9-10. С. 146-153.

К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

ДРЕМИЧЕВА Е.С., ЗВЕРЕВА Э.Р. Изучение коррозионных процессов нефтяного

оборудования. № 1-2. С. 138-143.

РЕЦЕНЗИИ И ИНФОРМАЦИЯ

ГУРЕВИЧ В.И. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него. № -9-10. С. 166.