

ЭНЕРГЕТИКА

ПАВЛОВ Н.В., ИВАНОВА А.Е., ПЕТРОВА Т.Н. Структурный анализ топливно-энергетического баланса республики Саха (Якутия).	3
ГРАЧЕВА Е.И., САДЫКОВ Р.Р., ХУСНУТДИНОВ Р.Р. Сравнительный анализ методов и погрешностей расчета потерь активной мощности в низковольтных цеховых сетях.	13
ГЕРКУСОВ А.А., ГАБДУЛВАЛИЕВА Е.И. Экономическая коррекция плотностей тока в проводах действующих воздушных линиях 110-220 Кв.	25
КОЗЛОВ В.К., САБИТОВ А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов.	34
ГОЛУБ И.И., ВОЙТОВ О.Н., БОЛОЕВ Е.В., СЕМЕНОВА Л.В. Выбор краткосрочной фиксированной конфигурации распределительной сети.	39
ТАЙМАРОВ М.А., АХМЕТОВА Р.В., МАРГУЛИС С.М., КАСИМОВА Л.И. Влияние кавитационной обработки на выгорание частиц мазута в топках котлов.	52

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ
И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

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.	60
ГЕОРГИЕВСКАЯ Е.В. Применение механики разрушений для прогнозирования ресурса радиально-осевых гидротурбин.	71
ЛИПАНТЬЕВ Р.Е., ТУТУБАЛИНА В.П. Влияние числа оборотов пропеллерной мешалки на скорость окисления сульфидов масляной фракции в реакторе смешения.	79

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

НАУМОВ А.А. Участие населения и приравненных к нему потребителей в регулировании графика потребления ЭЭ.	84
БУРКОВ А.Ф., ЮРИН В.Н., АВЕТИСЯН В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей.	92
ВАРЕНОВ А.А., ЗЕНЦОВ В.П., МАЛЁВ Н.А. Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры в инкубационной камере.	101
БОЛЬШАНИН Г.А. Уравнения пассивного восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.	109

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИВАНОВА В.Р., ФЕТИСОВ Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях. . . .	120
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. .	129
САДЫКОВ М.Ф. Автоматизированная многофункциональная установка для исследования, разработки и тестирования двигателя внутреннего сгорания.	138

ФИЗИКА

ШАРИПОВ И.И., КРУГЛОВ Л.В., КРУГЛОВ В.И., ДМИТРИЕВА О.С. Разработка конструкции струйно-пленочного контактного устройства с целью интенсификации теплообмена.	146
КИСЕЛЁВ В.Г. Тепловые машины Филиппа и Карно с точки зрения теории термодинамических потенциалов.	154

РЕЦЕНЗИИ И ИНФОРМАЦИЯ

ГУРЕВИЧ В.И. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него.	166
---	-----

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

PAVLOV N.V., IVANOVA A.E., PETROVA T.N. Structural analysis of the Sakha republic (Yakutia) fuel and energy balance.	3
GRACHEVA E.I., SADYKOV R.R., KHUSNUTDINOV R.R. Comparative analysis of methods of calculation and errors of active power losses in low voltage commercial networks	13
GERKUSOV A.A. GABDULVALIEVA E.I. Economic correction of current densities in the wires of the existing overhead lines of 110-220 kV.	25
KOZLOV V.K., SABITOV A. KH. The degree of polymerization of power transformers' paper insulation.	34
GOLUB I.I., VOITOV O.N., BOLOEV E.V., SEMENOVA L.V. Choice of short-term constant configuration of the distribution network.	39
TAYMAROV M.A., AKHMETOVA R.V., MARGULIS S.M., KASIMOVA L.I. The effect of cavitation treatment on the extinguishing of particles of oils in fuel boilers.	52

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING

PLOTNIKOV L.V., BRODOV Y.M., ZHILKIN B.P., KOICHEV N.S. Comparative analysis of the features of spraying a heated gas and superheated liquid through cylindrical channels with slices. .	60
GEORGIEVSKAIA E.V. Application of breakdown mechanics for predicting the resource of axial radial hydroturbins.	71
LIPANTYEV R.E., TUTUBALINA V.P. Effect of propeller mixer turns number on the sulfides oxidation rate in the oil phase in a mixing reactor.	79

ELECTRICAL ENGINEERING

NAUMOV A.A. Participation of population and equated consumers in regulation of energy consumption schedule.	84
BURKOV A.F., YURIN V.N., AVETISYAN V.R. Studies of possibilities of energy efficiency of asynchronous motors improvement.	92
VARENOV A.A., ZENTSOV V.P., MALYOV N.A. Dynamic processes analysis in the temperatures stabilization system, in the incubation chamber.	101
BOLSHANYN G.A. Equivalents of the passive eight-earth polar with three input and five output conclusions.	109

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

IVANOVA V.R., FETISOV L.V. Development of training bench for effective and safe operation of standby power supply at industrial enterprises.	120
GATIYATOV I.Z., SABITOV L.S. KASHAPOV N.F., GILMANSHIN I.R., KIYMOV I.K. Methods and systems of inspection of supports of tubular rods used in power engineering construction when exposed to static and dynamic loads.	129
SADYKOV M.F. Automated multifunctional installation for the research, development and testing of internal combustion engine.	138

PHYSICS

SHARIPOV I.I., KRUGLOV L.V., KRUGLOV V.I., DMITRIEVA O.S. Development of the structure of the-jet film contact device construction for intensification of heat mass exchange.	146
KISELEV V.G. Carnot and philips heat engines in view of the theory of thermodynamic potentials.	154

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 620.9:338.45(470.621)

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Н.В. Павлов, А.Е. Иванова, Т.Н. Петрова

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
г. Якутск, Россия
pavlov_nv@iptpn.ysn.ru

Резюме: На основе составленных годовых топливно-энергетических балансов проведен структурный анализ динамики производства, вывоза и потребления топливных энергоресурсов в Республике Саха (Якутия) на период с 2006 по 2015 гг., выявлены тенденции производства и потребления энергоресурсов.

Ключевые слова: энергопотребление, топливно-энергетический баланс, темп прироста энергопотребления, структурные сдвиги.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-3-12

Для цитирования: Павлов Н.В., Иванова А.Е., Петрова Т.Н. Структурный анализ топливно-энергетического баланса республики Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 3-12. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-3-12.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA) FUEL AND ENERGY BALANCE

N.V. Pavlov, A.E. Ivanova, T.N. Petrova

Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
pavlov_nv@iptpn.ysn.ru

Abstract: Structure analysis of the dynamics of fuel energy resources production, export and consumption in the Sakha Republic (Yakutia) for the period from 2006 to 2015 has been conducted based on the compiled annual fuel and energy balances, trends in energy production and consumption are identified as well.

Keywords: energy consumption, the energy balance, the growth rates, structural shifts.

For citation: N.V. Pavlov, A.E. Ivanova, T.N. Petrova Structural analysis of the Sakha republic (Yakutia) fuel and energy balance // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) Республики Саха (Якутия) в последние годы изменяется в количественном и, что более важно, структурном плане. Изменения отражают, в первую очередь, особенности энергетической политики страны, вследствие чего ТЭК усиливает основополагающую роль в экономике республики, а также является одной из значимых и приоритетных отраслей для интенсивного развития экономики страны и Дальнего Востока. Так, в данное время, в республике добывается 4,1% угля России и 39,8% Дальнего Востока, соответственно нефти – 1,8% и 36,2%, природного и попутного газа – 0,4% и 8,8%, вырабатывается 0,8% и 17,6% электро-, а также 1,1% и 20,1% тепловой энергии соответственно [1, 2].

В настоящее время в России существуют программные документы, определяющие стратегическое развитие топливо-энергетического комплекса страны и рассматриваемого региона: «Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.», «Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года», «Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года, Государственная программа Республики Саха (Якутия) «Развитие энергетики Республики Саха (Якутия) на 2018–2022 годы [3–7].

В проведенном исследовании использованы показатели Федеральной службы государственной статистики, показатели форм статистической отчетности 11-ТЭР, 6-ТП, годовые отчеты крупных энергетических предприятий¹. Началом анализируемого периода выбран 2006 год – год, с которого Федеральная служба государственной статистики начала проводить классификацию отраслей народного хозяйства по видам деятельности. Валовой региональный продукт рассчитан в сопоставимых ценах 2006 года, по видам деятельности – с использованием индексов производства к предыдущему году [8].

В данной работе составлены ежегодные ретроспективные сводные топливо-энергетические балансы (далее – ТЭБ) с 2006 по 2015 гг. Как отмечено в работе Санеева и др., «анализ отчетных ТЭБ позволяет выявить имеющиеся в ТЭК региона проблемы и с учетом их устранения сформировать прогнозные балансы» [2]. Кроме того, на основе ТЭБ определяются показатели энергоэффективности экономики [9,10].

Хотя состав отраслей, образующих ТЭК Республики Саха (Якутия), за период существенно не изменился, в производстве и потреблении произошли существенные структурные изменения в количественном и качественном отношении.

В производстве (добыче) топливо-энергетических ресурсов (ТЭР) изменения происходят в сторону увеличения. Так если производство ТЭР за рассматриваемый период в количественном выражении выросло в 2,3 раза (с 13252 до 30836 тыс. т у.т.), то в структурном оно изменилось следующим образом: объем добычи нефти и газового конденсата вырос в 23,2 раза: с 588 до 13658 тыс. т у.т., и в структуре ТЭБ увеличился в 10 раз: с 4,4 до 44,3%; добыча природного и попутного газа в объемах увеличилась в 1,7 раза, при этом в структуре сократилась с 14,2 до 10,5%; объем добычи угля также увеличился в 1,3 раза, но в структуре сократился с 1,8 до 1,3%. Доля производства гидроэнергии и заготовки дровяного топлива тоже сократилась, с 3,4 до 1,3% от общего объема производства ТЭР (рис. 1).

Основной скачок по добыче энергоресурсов происходит в нефтегазовой отрасли за счет реализации экспортоориентированного проекта Талаканского нефтегазоконденсатного

¹ Годовые отчеты ПАО «Якутскэнерго», АО «ДГК», АО «Сахазэнерго», ГУП «ЖКХ РС(Я)», АО «Теплоэнергосервис» и др. с 2006 по 2015 гг.

месторождения (НГКМ), который также способствует увеличению объемов добываемого газа в связи с попутно извлекаемым газом. Данный попутный газ используется для выработки электро- и теплоэнергии газотурбинной электростанцией (ГТЭС) мощностью 133,4 МВт, построенной на месте добычи. Также газ используется на иные нужды, в основном – для поддержания давления пласта, путем обратной закачки.

В угольной промышленности происходит смена способа добычи угля. В южной части республики на смену открытому способу добычи угля вводятся в строй угольные шахты с обоганительными фабриками. Одним из крупных проектов, введенных в угольной отрасли за рассматриваемый период, является освоение экспортноориентированного Эльгинского месторождения каменных углей, где теперь добывается 1/4 объема добычи в республике.

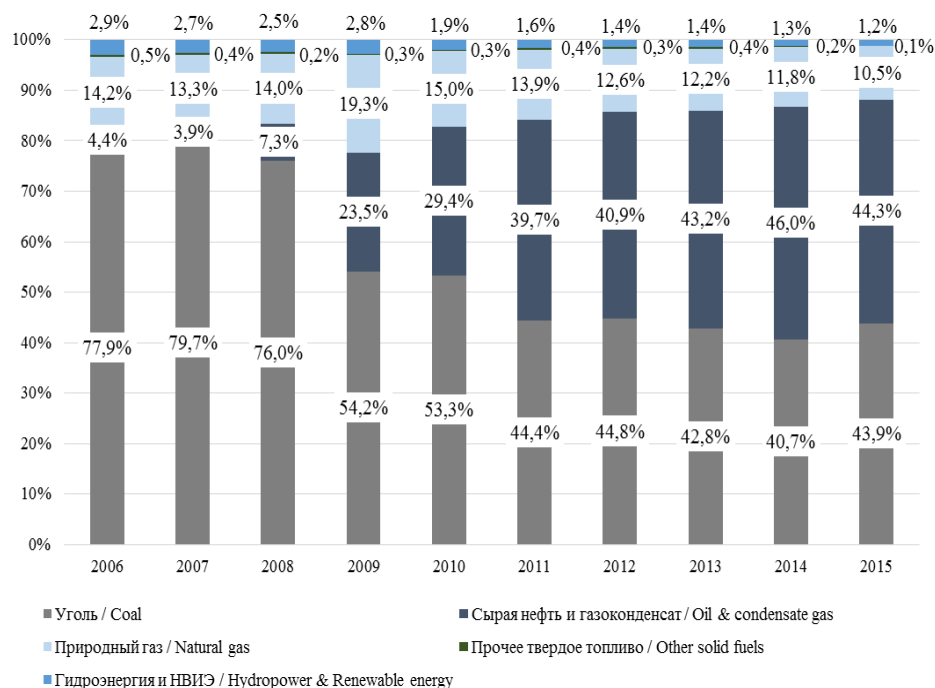


Рис. 1. Структура производства топливно-энергетических ресурсов республики

Увеличение добычи ТЭР связано с ростом экспорта и вывоза в регионы страны. В 2015 г. объем вывоза составил 79,1% добытых ТЭР (около 24,4 млн. т у.т.) против 63,5% в 2006 г. Если в 2006 г. вывоз энергоресурсов практически состоял только из коксующихся углей Южной Якутии (98,6%), то начиная с 2011 г. большая часть вывоза ТЭР приходится на долю экспортируемой нефти с Талаканского НГКМ – около 54,0% (рис. 2). Таким образом, почти весь объем добытой нефти вывозится за пределы республики через нефтепроводную систему ВСТО (к концу периода составил 96,5% от добычи).

Внутреннее потребление первичных энергоресурсов за период выросло на 35%. В общей структуре потребления энергетических ресурсов увеличилась доля газа. В 2015 г. она составила 35% против 30% в 2006 г. (рис. 3). Потребление газа на душу населения в 2015 г. составило 2,8 т у.т.

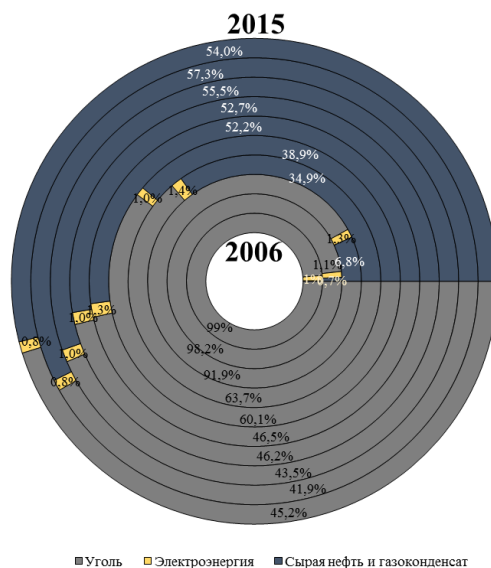


Рис. 2. Вывоз энергоресурсов за пределы республики

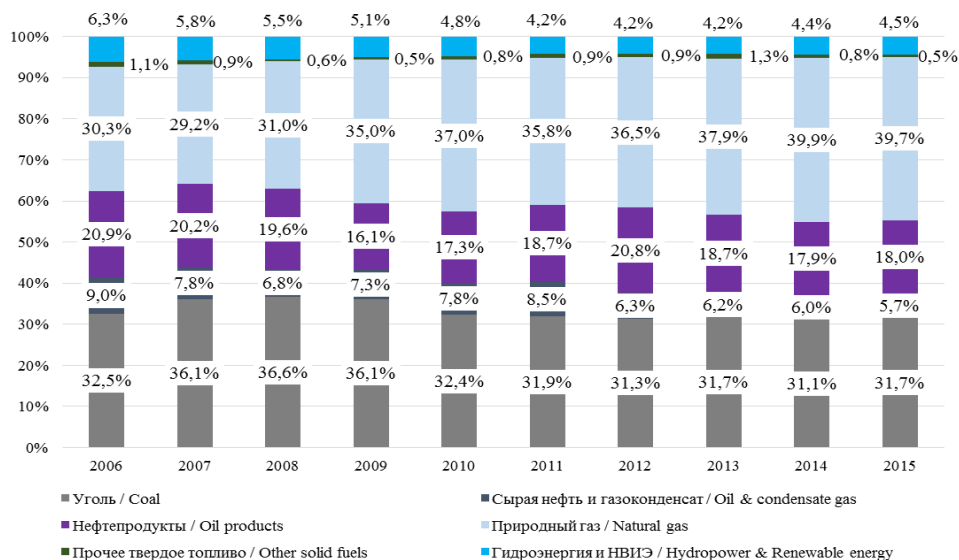


Рис. 3. Структура внутреннего потребления энергоресурсов республики

Добытый газ полностью идет на внутренние нужды республики. Как было сказано ранее, в последние годы помимо природного газа потребляется и попутный газ нефтяных месторождений. В структуре потребления газа большая часть (70%) используется для производства теплоэнергии. Остальная часть идет на выработку электроэнергии.

Потребление сырой нефти, которую в основном используют для выработки теплоэнергии котельными, сокращается, что является результатом реализации программы оптимизации котельного топлива по переводу с жидкого топлива на газ или твердое топливо.

Доля угля в общем потреблении остается на одном и том же уровне, в структуре потребления – уменьшается. В дальнейшем намечается ее увеличение во внутреннем потреблении.

Почти весь объем нефтепродуктов, потребляемых в республике, завозится извне. В 2015 г. доля в общем потреблении находилась на уровне 18,0%. Потребление дизельного топлива за период выросло на 10,0%, бензина автомобильного – на 51,0%. Из всего количества потребляемых нефтепродуктов большая часть (88,7%) используется в качестве моторного топлива, остальная часть потребляется в качестве котельно-печного топлива для производства электроэнергии и тепла. Потребление нефтепродуктов на душу населения в 2015 г. составило 1,5 т у.т. Значения показателей нефтепродуктов в топливно-энергетическом балансе республики 2012 г. сильно превосходили показатели предыдущих годов, что могло стать причиной резкого падения темпа прироста энергопотребления в 2013 г.

В конечном потреблении (рис. 4) преобладает доля теплоэнергии, около 58,5% в среднем за период, 27,7% – составляют нефтепродукты, остальная часть, 13,8%, приходится на электроэнергию.

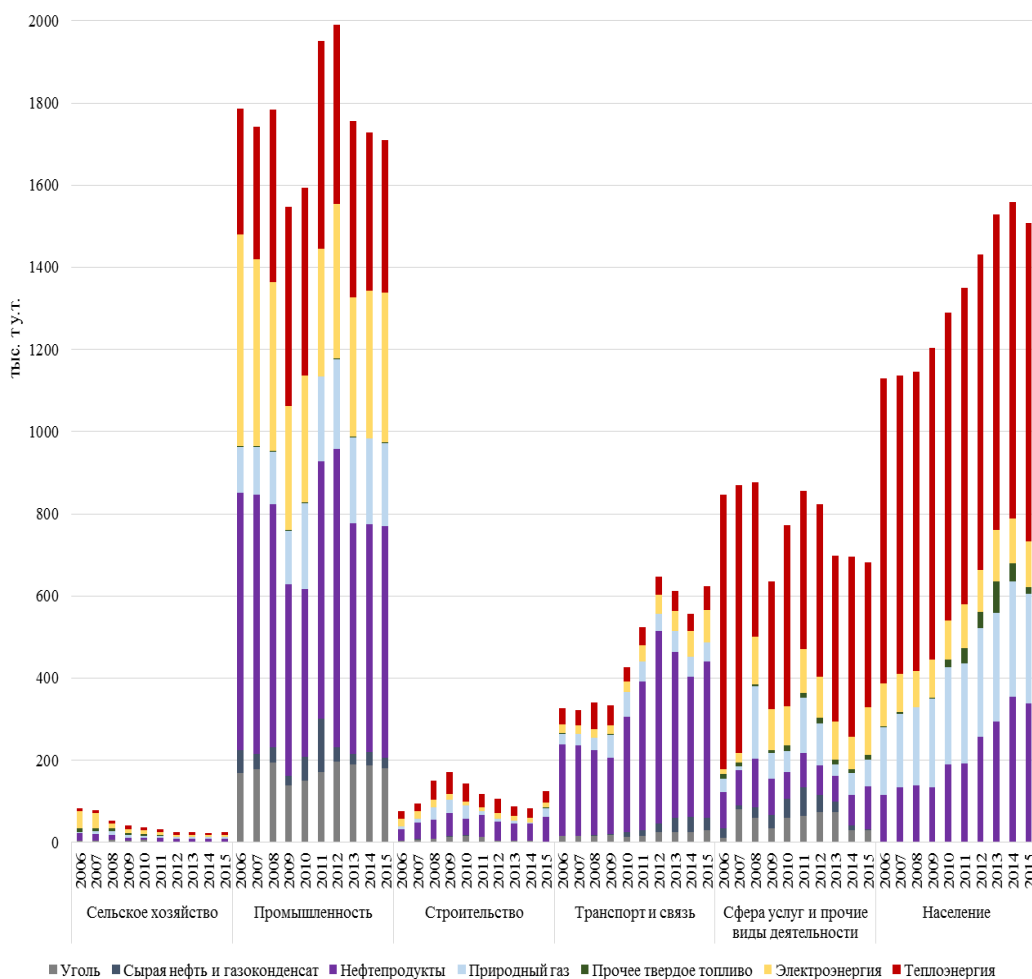


Рис. 4. Структура конечного потребления энергоресурсов по видам экономической деятельности республики

Средний темп прироста конечного потребления за период составил 1,4%: темп прироста потребления нефтепродуктов равен 4,1%, электропотребления – 1,2%, теплоэнергии – 0,5%. В структуре конечного потребления наибольшую долю занимают промышленность и население. Снижение потребления нефтепродуктов и угля промышленностью в 2009–2010 гг. может быть связано с кризисными явлениями 2008 г. Стабильный рост потребления энергии и моторного топлива населением свидетельствует о росте уровня жизни в республике.

Среднедушевое республиканское потребление энергетических ресурсов в 2015 г. составило 8,42 т у.т., что примерно на 10,2% больше среднероссийского потребления. По сравнению с 2006 г. данный показатель вырос на 29,7%.

Кризис 2008 г. отразился на экономике республики падением темпов потребления энергоресурсов и промышленного производства. Рост ВРП до конца периода (кроме 2009 г.) сопровождался ростом промышленного производства (рис. 5). При этом наблюдался стабильный рост электропотребления.



Рис.5. Динамика темпов прироста ВРП, энерго-, электропотребления и промышленного производства

Среднегодовой темп прироста промышленного производства составил 6,0%, электропотребления – 1,2% (табл. 1). Причем с 2010 г., если исключить 2009 г., средний рост электропотребления находился на уровне 3,0%. На рост экономики 2010 г. в большей степени повлиял скачок промышленного производства, который, можно сказать, произошел в результате увеличения добычи нефти на Талаканском НГКМ. Среднегодовой темп прироста энергопотребления превышает темпы прироста ВРП и электропотребления.

Таблица 1

Темпы прироста ВРП, энерго-, электропотребления и промышленного производства

Темпы прироста	Годы									Среднегодовой темп прироста
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
ВРП	4,2	7,2	-2,4	1,6	7,1	3,2	0,9	3,2	1,7	3,0
Энергопотребление	2,9	4,7	-1,9	5,4	11,8	5,3	-0,5	-0,8	1,9	3,2
Промышленное производство	0,5	4,2	-13,6	22,8	16,1	9,0	6,2	4,9	3,6	6,0
Электропотребление	-3,6	2,2	-6,2	2,9	3,3	4,6	0,8	2,7	3,8	1,2

В целях выявления тенденций развития отраслей ТЭК, рассмотрим динамику среднегодовых темпов роста (снижения) энергоресурсов по видам топлива и энергии. В табл. 2 приведена динамика изменения среднегодовых темпов роста (снижения) производства и потребления энергоресурсов, представленная за весь рассматриваемый период и с выделением послекризисного периода. Исключение периода с охватом кризисного (2008 г.) и послекризисных (2009 и 2010 гг.) годов позволяет осуществить реалистичный подход к прогнозированию темпов роста ТЭР. С учетом такого подхода средний темп роста энергоресурсов сформирован на период с 2011 по 2015 гг. Данный период в республике также явился началом активной реализации крупных инвестиционных проектов (выход на проектную мощность освоения Талаканского НГКМ, ввод трубопроводной системы ВСТО, перевод добычи угля на шахтный способ, освоение Эльгинского месторождения коксующихся углей, и т.д.).

Таблица 2

Среднегодовые темпы прироста производства и потребления
топливно-энергетических ресурсов

Статья баланса	2006–2015	2011–2015
Добыча (производство) ТЭР, всего,	10,42	11,32
в том числе:		
- нефть и газовый конденсат	49,63	23,35
- природный и попутный газ	4,44	1,50
- уголь	4,90	6,92
- гидроэнергия	-0,52	2,11
- прочие (дрова)	3,04	-1,82
Внутреннее потребление, всего,	3,19	3,52
в том числе:		
- нефть и газовый конденсат	-1,16	-1,69
- природный и попутный газ	4,12	2,46
- уголь	3,01	3,19
- гидроэнергия	-0,52	2,11
- нефтепродукты	2,97	-1,59
- прочие (дрова)	3,10	-1,82
Конечное потребление, всего,	1,4	2,6
в том числе:		
- сельское хозяйство, рыболовство и рыбоводство	-11,6	-7,1
- промышленность	0,0	2,0
- строительство	9,1	-0,1
- транспорт и связь	8,2	8,8
- сфера услуг и прочие виды деятельности	-0,6	1,3
- население	3,3	3,2

Исходя из вышесказанного, средний темп прироста производства ТЭР с 2011 по 2015 гг. составил 11,32 %. При этом темп прироста добычи нефти достиг 23,35 %. Более медленный темп роста добычи угля в первой половине рассматриваемого периода можно

объяснить негативным влиянием мирового финансового кризиса, который отразился на добыче 2009 г. из-за снижения цен на угольных рынках. Другим фактором является произошедшая крупная авария на обогатительной фабрике «Нерюнгринская», в результате которой общая добыча угля в 2011 г., по сравнению с предыдущим годом, снизилась на 13,8 %. Увеличение добычи угля в перспективе произойдет за счет роста добычи углей Южной Якутии, в том числе Эльгинского месторождения, ориентированного на экспорт.

Темп роста потребления первичных энергоресурсов составил 3,52 %, в том числе устойчивые темпы по углю 3,19 % и по природному газу 2,46 %. По потреблению нефти, нефтепродуктов и дров намечается тенденция снижения со среднегодовым снижением 1,69, 1,59 и 1,82 % соответственно.

Таким образом, во второй половине рассматриваемого периода темпы роста добычи ТЭР в республике выше, чем за весь период, на 0,9 п.п., а потребления – на 0,33 п.п. В целом изменения темпов роста экономики республики сопровождаются снижением промышленного производства за весь и ростом во второй половине анализируемого периода. Для последующего прогнозирования и выявления тенденций изменения объемов производства и потребления ТЭР в топливно-энергетическом балансе республики в качестве целевых ориентиров можно использовать темпы роста за период с 2011 по 2015 гг.

Если за весь рассматриваемый период темп энергопотребления в среднем составлял 1,4 %, то с 2011 по 2015 гг. показал увеличение потребления почти в 2 раза. При этом среднегодовые темпы энергопотребления в отраслях конечного потребления неоднозначны. Стабильно растут темпы потребления промышленности, транспорта и связи, населения. Кризисные явления, происходившие за весь период, негативно повлияли на темпы потребления в строительстве и сфере услуг.

С помощью полученных данных о динамике энергопотребления и ВРП отраслей рассчитаны средние коэффициенты эластичности. За рассматриваемый период наиболее чувствительными к изменениям динамики ВРП являлись транспорт и связь, сельское хозяйство и строительство, при этом за выделенный период с 2011 по 2015 гг. коэффициенты эластичности оказались выше. Это связано со снижением темпов роста вклада в ВРП по данным отраслям. Эластичность промышленного производства обратно пропорциональна и менее чувствительна к изменению ВРП. Так, энергопотребление промышленностью сокращалось, вклад в ВРП – рос (рис. 6).

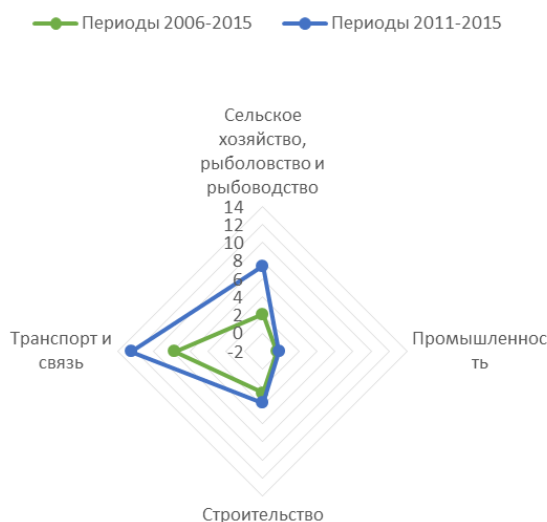


Рис. 6. Эластичность энергопотребления

Заключение

Выявлены темпы прироста производства и потребления энергоресурсов, конечного потребления, на основе которых можно осуществлять краткосрочные прогнозы и тенденции изменения показателей производства (добычи) и конечного потребления топливно-энергетических ресурсов республики. В производстве и потреблении энергоресурсов сохраняется устойчивая тенденция роста. При этом производство растет более высокими темпами, чем потребление. Среди энергоресурсов в потреблении доминирующая роль принадлежит природному газу. Но со второй половины периода темпы роста угля начали превышать темпы роста природного газа. За рассматриваемый период произошли изменения в потреблении энергоресурсов по видам деятельности. Стабильная тенденция роста потребления наблюдалась у населения (на 5,7 %), строительства – 5,6 % и транспорта – 0,9 %, уменьшения – в промышленном производстве (5,5 %), сфере услуг – (5,3 %) и сельском хозяйстве (1,4 %). В результате индекс структурных сдвигов составил 0,92, другими словами, средний объем конечного потребления снизился на 7,8 % (92,2–100 %) за счет изменения его структуры.

Средняя эластичность энергопотребления промышленного производства к ВРП за весь период составила (-0,4), что характеризует относительно стабильное его состояние. Высокое значение коэффициента эластичности энергопотребления по транспорту и связи связано с реализацией инфраструктурных инвестиционных проектов, увеличением сторонних услуг по транспортировке грузов в этой области и др. факторами.

Литература

1. Петров Н.А., Санеев Б.Г. Роль топливно-энергетического потенциала Республики Саха (Якутия) в реализации восточной энергетической стратегии России // Труды VII Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата. 2014. С.392–398.
2. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И. Энергоэкономический анализ существующего состояния региональных топливно-энергетических комплексов Востока России // Энергетическая политика. 2016. №5. С. 14–22.
3. Энергетика России: взгляд в будущее (Обосновывающие материалы к Энергетической стратегии России на период до 2030 года). Москва: Издательский дом энергия, 2010. 616 с.
4. Энергетическая стратегия России до 2035 года. URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/1920/69055> (дата обращения: 19.02.2018).
5. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года. Москва: СОПС, 2010. 400 с.
6. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года / Правительство Республики Саха (Якутия). Якутск; Иркутск: Медиа-холдинг «Якутия», и др. 2010. 328 с.
7. Государственная программа Республики Саха (Якутия) «Развитие энергетики Республики Саха (Якутия) на 2018–2022 годы». URL: <http://docs.cntd.ru/document/543709071> (дата обращения: 19.02.2018).
8. Федеральная служба государственной статистики – Интерактивная витрина URL: <http://cbsd.gks.ru> (дата обращения: 19.02.2018).
9. Taib S. Tools and Solution for Energy Management / S. Taib, A. Al-Mofleh // Energy Efficiency – The Innovative Ways for Smart Energy, the Future Towards Modern Utilities. October 17, 2012. <http://dx.doi.org/10.5772/48401>.
10. Иванова А.Е., Павлов Н.В., Петрова Т.Н. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия) // Региональная экономика: теория и практика. 2017. Т.15. №11 (446). С.2123–2137.

Авторы публикации

Павлов Никита Владимирович – врио заведующего отделом проблем энергетики Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

Иванова Альбина Егоровна – ведущий инженер Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

Петрова Татьяна Николаевна – ведущий инженер Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

References

1. Petrov N.A, Saneev B.G. Role of Fuel and Energy Potential of the Republic of Sakha (Yakutia) in the Implementation of the Eastern Energy Strategy of Russia // Proceedings of the VII Eurasian Symposium on the Reliability of Materials and Machines for the Cold Climate Regions. 2014. P.392–398.
2. Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. Energy and economic analysis of the current state of regional and energy complexes in the Russian East / Energy policy. 2016. №5. P. 14–22.
3. Russia's Energy: Looking forward to the future (Substantiating materials for the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030). Publishing house Enerгия. 2010. 616 p.
4. Energy strategy of Russia for the period up to 2030. URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/1920/69055> (reference date: 19.02.2018).
5. Scheme of complex development of productive forces, Transport and Energy of the Republic of Sakha (Yakutia) till 2020. SOPS, Moscow, 2010. 400 p.
6. Energy strategy of the Sakha Republic (Yakutia) for the period up to 2030. Yakutsk: Irkutsk, Media holding company of Yakutia, 2010. 328 p.
7. State Program of the Sakha Republic (Yakutia) “Development of the Energy Sector of the Sakha Republic (Yakutia) for 2018–2022”. URL: <http://docs.cntd.ru/document/543709071> (reference date: 19.02.2018).
8. Federal State Statistics Service – Interactive showcase URL: <http://cbsd.gks.ru> (reference date: 19.02.2018).
9. Taib S., Al-Mofleh. Tools and Solution for Energy Management // Energy Efficiency – The Innovative Ways for Smart Energy, the Future Towards Modern Utilities. October 17, 2012. <http://dx.doi.org/10.5772/48401>.
10. Ivanova A.E., Pavlov N.V., Petrova T.N. Energy efficiency in the Sakha (Yakutia) Republic. Regional Economics: Theory and Practice. 2017. T. 15, №11(446). P.2123–2137.

Authors of the publication

Nikita V. Pavlov – Acting Head of the Energy Problems Department, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Albina E. Ivanova – Leading engineer, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Tatyana N. Petrova – Leading engineer, Larionov Institute of the Physical-technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Поступила в редакцию

30 марта 2018 г.



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Е.И. Грачева¹, Р.Р. Садыков², Р.Р. Хуснутдинов¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Приволжские электрические сети, Филиал ОАО «Сетевая компания», Россия

khrr@yandex.ru

Резюме: В статье проведен анализ некоторых методов расчёта потерь активной мощности в низковольтных промышленных сетях с учетом основных влияющих параметров. Определено эквивалентное сопротивление и потери активной мощности в радиальных и магистральных схемах. Вычислены погрешности эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности схем относительно эталонных значений. Разработаны графические зависимости эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем цеховых сетей с учетом коммутационных аппаратов на линиях в функциях таких параметров, как суммарное сечение линий, средние значения длины, сечения линий и температуры окружающей среды, а также при изменении коэффициента загрузки линий. Предлагаемые номограммы обладают высокой точностью и могут применяться в практических расчетах.

Ключевые слова: цеховые сети, потери активной мощности, эквивалентное сопротивление, коэффициент загрузки, коммутационные аппараты, температура окружающей среды.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24

Для цитирования: Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р. Сравнительный анализ методов и погрешностей расчета потерь активной мощности в низковольтных цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 13-24. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATION AND ERRORS OF ACTIVE POWER LOSSES IN LOW VOLTAGE COMMERCIAL NETWORKS

E.I.Gracheva¹, R.R.Sadykov², R.R.Khusnutdinov¹

¹Kazan state power university, Kazan, Russia

²Privolzhsky electrical networks, Branch of JSC "Grid Company".

khrr@yandex.ru

Abstract: The article analyzes some methods for calculating the loss of active power in low-voltage industrial networks, taking into account the main influencing parameters. Equivalent resistance and losses of active power in radial and trunk circuits are determined. The errors of the equivalent resistance and the loss of the active power of the circuits relative to the reference values are calculated. Graphic dependencies of the equivalent resistance of the radial and trunk circuits of the industrial networks are taken into account, taking into account switching devices

on the lines in the functions of such parameters as the total cross-section of lines, average lengths, cross-sections of lines and ambient temperature, and with a change in the line load factor. The proposed nomograms are highly accurate and can be used in practical calculations.

Keywords: industrial network, loss of active power, equivalent resistance, load factor, switching devices, ambient temperature.

For citation: E.I. Gracheva, R.R. Sadykov, R.R. Khusnutdinov Comparative analysis of methods of calculation and errors of active power losses in low voltage commercial networks // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 13-24. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24.

Введение

Отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, определяющих эти параметры, ведет к погрешностям до 70 % при вычислении потерь электроэнергии (ЭЭ) [1–4]. Как показали исследования, при расчётном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей необходимо иметь информацию о следующих величинах [5–9]:

- точном значении длин линий цеховых сетей;
- перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;
- сопротивлениях контактных соединений коммутационных аппаратов и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой, и при этом сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;
- данных о графиках нагрузки.

Как известно, цеховые сети напряжением до 1000 В внутризаводских систем электроснабжения, из-за их большой протяженности и разветвленности, характеризуются довольно высокими потерями ЭЭ. Вследствие этого повышение точности расчётов потерь в сетях низкого напряжения является, на сегодняшний день, весьма актуальной задачей [10–13]. Для исследования возможных погрешностей вычисления потерь определим эквивалентные сопротивления отдельно для радиальной и магистральной схем цеховой электрической сети тремя следующими способами:

- поэлементного расчета;
- по расчётному выражению;
- по номограммам.

Исследование методов и погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в цеховых сетях

Наиболее точный способ определения потерь ЭЭ – расчетный по отдельным элементам, который широко применяется на практике.

Потери активной мощности в линиях трехфазного тока при симметричной нагрузке определяются по выражению

$$P = 3I^2R, \quad (1)$$

где I – расчётный ток в линии; R – активное сопротивление линии. Тогда потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P \cdot T, \quad (2)$$

где T – расчетный период времени, за который рассчитываются потери.

Сопротивление участка сети зависит от марки, сечения и длины провода, температуры его токопроводящей жилы, являющейся функцией температуры окружающей среды и нагрузки провода.

В качестве исходных данных для определения эквивалентного сопротивления линий радиальной сети примем следующие значения: средняя длина линий $l_{\text{ср}}$ равна 20 м; количество линий $n = 3$. При этом расчетный ток в линиях равен 55; 70; 85 А для линий сечением от 16 до 35 мм² соответственно. Коэффициент загрузки линий равен 0,7. Температура окружающей среды +20 °С. Схема радиальной сети показана на рис. 1.

При расчете сопротивления R участка сети должно быть учтено влияние токопроводящих жил и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов [1]:

$$R = \left\{ r_{20} \cdot l \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{\text{ж}} - 20)] + \sum r_k \right\} \cdot \frac{1}{n}, \quad (3)$$

$$\theta_{\text{ж}} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (4)$$

где r_{20} – сопротивление 1 м жилы провода при температуре 20 °С; α – температурный коэффициент сопротивления, равный для меди и алюминия приблизительно 0,004 °С⁻¹; $\theta_{\text{ж}}$ – температура жилы кабеля или провода; θ_0 – допустимая температура нагрева жилы кабеля; l – длина линии; $\sum r_k$ – сумма сопротивлений автоматических выключателей, установленных на линии; n – количество отходящих линий.

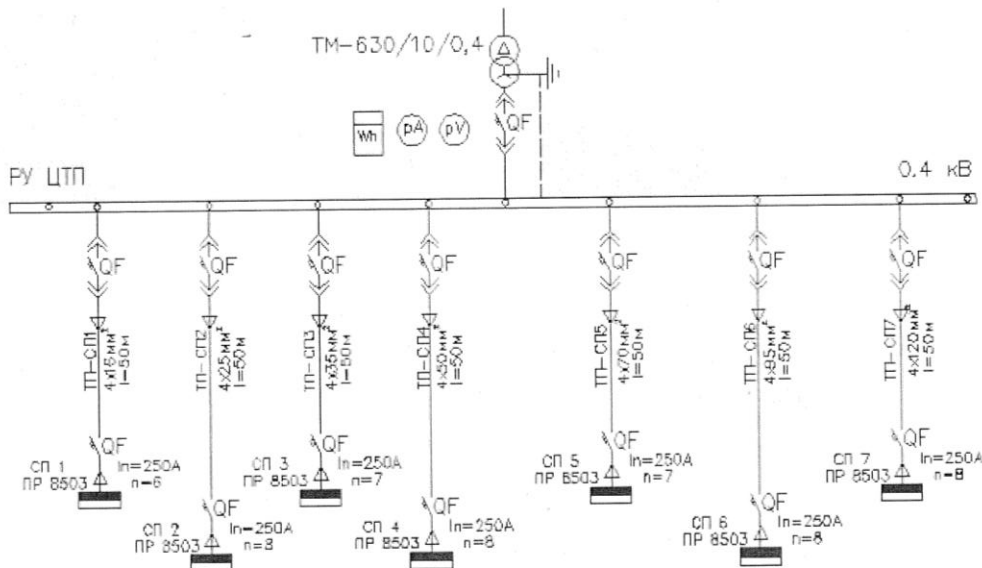


Рис. 1. Радиальная схема цеховой электрической сети

Аналитические зависимости сопротивлений коммутационных аппаратов от их номинальных токов, полученные в результате экспериментальных исследований, представлены в табл. 1. За основу принята гиперболическая зависимость $R = A/I_n$, где I_n – номинальный ток коммутационного аппарата. На основании метода наименьших квадратов определены коэффициенты A для различных типов аппаратов. Погрешность вычисления составила при этом $\pm 5\%$.

Результаты исследований погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в радиальных сетях

Приведем пример расчета для линии ТП – СП1:

По исходным данным для данной линии $I_{p1} = 55\text{A}$, $I_{\text{Д}} = 60\text{A}$, что соответствует сечению 16 мм². Сопротивление автоматических выключателей r_k , установленных на

линии, вычисляем, используя зависимости табл. 1.

$$\text{Следовательно } \eta_k = \frac{307}{I_n} = \frac{307}{60} = 5,12 \text{ Ом} .$$

Таблица 1

Аналитические зависимости сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов
от номинального тока

Аппараты	Номинальный ток I_n , А	Аналитическая зависимость сопротивления от номинального тока
Автоматические выключатели и контакторы	< 70	$R = 825/I_n$
	≥ 70	$R = 760/I_n$
Магнитные пускатели	< 60	$R = 349/I_n$
	≥ 60	$R = 307/I_n$
Предохранители	< 200	$R = 210/I_n$
	≥ 200	$R = 125/I_n$
Рубильники и пакетные выключатели	Любое значение	$R = 68/I_n$

Температура жилы кабеля или провода вычисляется по формуле

$$\theta_{ж} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0 = 0,7^2 \cdot (80 - 20) + 20 = 49,4 \text{ } ^\circ C$$

$$R = \left\{ r_{20} \cdot l \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{ж} - 20)] + \sum \eta_k \right\} \cdot \frac{1}{n} =$$

$$1,956 \cdot 20 \cdot [1 + 0,004 \cdot (49,4 - 20) + 5,12] = 48,84 \text{ мОм}.$$

Далее по выражению (1) определим потери активной мощности в рассматриваемой линии, где R – эквивалентное сопротивление одной линии:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 55^2 \cdot 48,84 = 443,20 \text{ Вт} .$$

Аналогично произведем поэлементный расчет потерь мощности для линий сечением 25 и 35 мм². При этом потери для каждой рассматриваемой линии определим отдельно, и в результате их суммирования по формуле (1) определим общее эквивалентное сопротивление радиальной сети, где I – эквивалентный расчетный ток схемы электрической цепи. Полученные результаты расчетов даны в табл. 2.

Таблица 2

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети поэлементным расчетом

Поэлементно для трех линий											
Сечение S , мм ²	$l_{ср}$, м	n , шт.	r_{20} , мОм/м	k_3^2 ,	θ_0 , °C	$\theta_{ж}$, °C	I_p , А	I_d , А	R , мОм	$R_{л}$, мОм	ΔP , Вт
16	20	1	1,956	0,49	20	49,4	55	60	5,12	48,84	443,20
25	20	1	1,25	0,49	20	49,4	70	75	4,09	32,03	4470,89
35	20	1	0,894	0,49	20	49,4	85	80	3,41	23,39	507,06

$$\text{Суммарный ток для трех линий } I_p = 55 + 70 + 85 = 210 \text{ А} .$$

Суммарное значение потерь активной мощности в линиях

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 55^2 \cdot 48,84 = 443,20 \text{ Вт} .$$

В итоге получаем эквивалентное сопротивление радиальной цеховой электрической сети $R_3 = \frac{\Delta P}{3 \cdot I_p^2} = 10,74 \text{ мОм}.$

Для приведенных выше исходных данных определим эквивалентное сопротивление сети по формуле (3). Для этого определим среднее значение сечений для данных линий:

$$S_{cp} = \frac{16+25+35}{3} = 25 \text{ мм}^2.$$

Результаты расчета эквивалентного сопротивления и потерь мощности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети по расчетному выражению

По формуле для трех линий											
Сечение $S, \text{ мм}^2$	$l_{cp},$ м	$n,$ шт.	$r_{20},$ мОм/м	$k_3^2,$	$\theta_0,$ °C	$\theta_{ж},$ °C	I_p А	$I_d,$ А	$R,$ мОм	R_n мОм	$\Delta P,$ Вт
25	20	3	1,25	0,49	20	49,4	70	75	4,09	13,41	1773,7

В результате получаем эквивалентное сопротивление радиальной цеховой электрической сети $R_3 = 13,41 \text{ мОм}$, потери активной мощности в линии $\Delta P = 1773,7 \text{ Вт}$.

Также эквивалентное сопротивление линий можно определить, используя номограммы. Номограммы для определения эквивалентного сопротивления – это графическое представление функции R_3 от нескольких переменных ($l_{cp}, n, s, k^2, \theta_0$), позволяющее с помощью простых геометрических операций исследовать функциональную зависимость без трудоемких вычислений. Приведенные ниже номограммы (рис. 2–5) построены для линий с различным сечением, средним значением длины и загрузки.

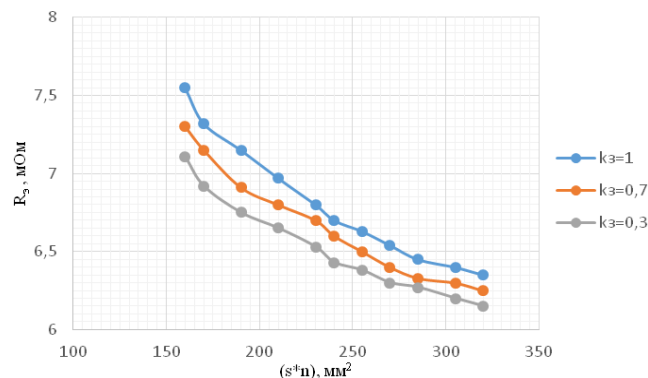


Рис. 2. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины 10 м и температуры окружающей среды 20 °C

Эквивалентное сопротивление, определенное по данным номограммам для трех линий со средним сечением 25 мм², принимает значение $R_3 = 13,4 \text{ мОм}$.

Потери активной мощности для данного эквивалентного сопротивления

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 210^2 \cdot 14,4 = 1772,82 \text{ Вт}.$$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше расчетов. Примем поэлементный расчет за эталонный метод и определим относительную погрешность для

каждого метода. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления и потерь мощности цеховой сети приведены в табл. 4.

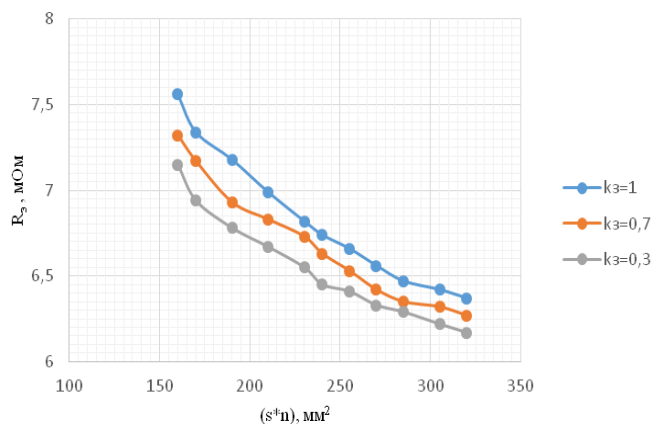


Рис. 3. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины 20 м и температуры окружающей среды 20 °С

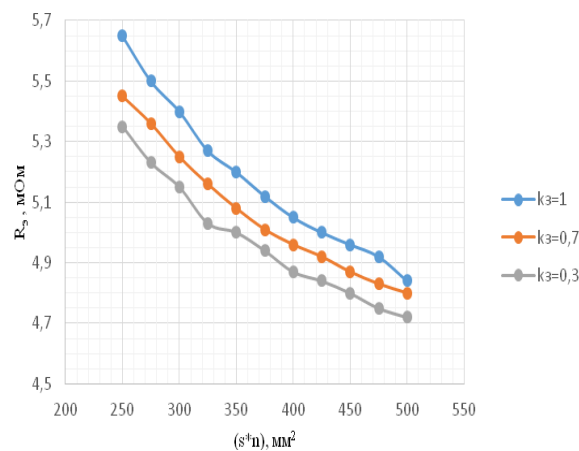


Рис. 4. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 25 мм², средней длины 10 м и температуры окружающей среды 20 °С

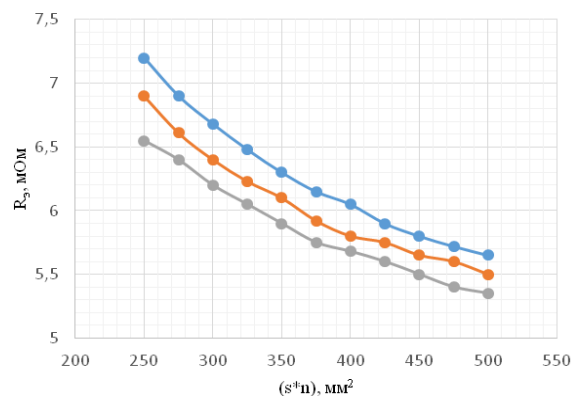


Рис. 5. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 25 мм², средней длины 20 м и температуры окружающей среды 20 °С

Таблица 4

Погрешности результатов расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности радиальной цеховой сети

Метод расчета	Эквивалентное сопротивление R_{Σ} , мОм	Потери активной мощности ΔP , Вт	Погрешность расчета, %
Поэлементный (точный)	10,74	1421,15	0
По формуле для среднего значения	13,41	1773,70	+20
По номограммам	13,4	1772,82	+19,9

Таким образом, определение эквивалентного сопротивления по формуле и по номограммам имеют примерно одинаковую погрешность по отношению к поэлементному методу расчета, который является эталонным. Данные погрешности связаны с усреднением расчетных величин.

Исследование погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в магистральных сетях

Линии магистральных сетей (рис. 6), как правило, представляют собой шинопроводы с распределенной электрической нагрузкой. В качестве параметров, определяющих потери ЭЭ и эквивалентное сопротивление, выступают такие величины, как длина шинопровода, количество приемников, подключенных к шинопроводу и т.д.

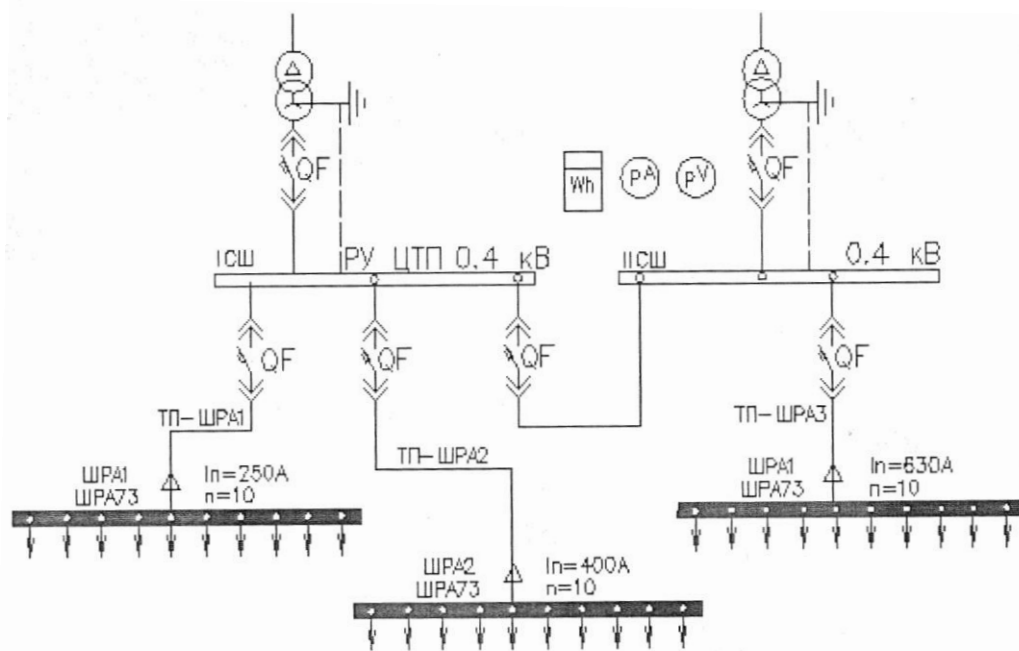


Рис.6. Магистральная схема цеховой электрической сети

Для магистральной схемы электроснабжения приведем аналогичный расчет эквивалентного сопротивления тремя вышеизложенными способами.

В качестве исходных данных примем следующие значения: средняя длина шинопровода 20 м; количество электроприемников, присоединенных к шинопроводу, $n=10$. Рассмотрим распределительный шинопровод типа ШРА-73 на номинальный ток 250 А.

Расчетный ток равен 180 А. Коэффициент загрузки шинпровода 0,8. Температура окружающей среды +35 °С.

Потери “активной мощности в магистральных сетях определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_{\text{э}}^2 \cdot R_{\text{эш}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{эш}}$ – эквивалентное сопротивление шинпровода, вычисляемое из уравнения

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot l \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{r_{\text{п}}}{n} \right] \cdot \left[1 + \alpha (\theta - \theta_0) \right] + \frac{r_{\text{к}}}{n}, \quad (6)$$

где $r_{\text{э}20}$ – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм; l – длина шинпровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу; $r_{\text{п}}$ – сопротивление провода ответвления от шинпровода, мОм; $I_{\text{э}}$ – эффективный ток, А; $r_{\text{к}}$ – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С; θ – температура шинпровода, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С.

Приведем пример расчета для шинпровода ШРА 1.

Исходные данные для данной линии: $I_{\text{рш}} = 180$ А, $I_{\text{нш}} = 250$ А.

Удельное сопротивление шинпровода $r_{\text{э}20}$ представляет собой сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С и определяется как $r_{\text{э}20} = 52/I_{\text{н}}$.

Таким образом, $r_{\text{э}20} = 52/I_{\text{н}} = 52/250 = 0,2$ мОм/м.

Размер шины на фазу для шинпровода марки ШРА-73 на номинальный ток 250 А равен 35x5 мм².

При известных величинах номинального тока шинпровода, коэффициента загрузки шинпровода, известном количестве присоединенных приемников можно определить ток, потребляемый одним приемником, по выражению

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{нш}}}{n} = \frac{250}{10} = 25 \text{ А}.$$

В соответствии с током приемника определяется сопротивление коммутационного аппарата ответвления по табл.1.

$$\text{Следовательно, } r_{\text{к}} = \frac{307}{I_{\text{н}}} = \frac{349}{32} = 10,91 \text{ мОм}.$$

Далее определяем соответствующий допустимый длительный ток:

$$I_{\text{д}} = 32 \text{ А, что соответствует сечению } 4 \text{ мм}^2.$$

Эквивалентное удельное сопротивление провода ответвления от шинпровода сечением 4 мм² равно $r_{\text{э}20} = 7,81$ мОм/м.

Сопротивление провода ответвления от шинпровода к приемнику (длина ответвительного провода принимается равной, в среднем, 2 м):

$$r_{\text{п}} = 2 \cdot 7,81 = 15,62 \text{ мОм/м}.$$

Определим эквивалентное сопротивление шинпровода по формуле (6):

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot l \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{r_{\text{п}}}{n} \right] \cdot \left[1 + \alpha (\theta - \theta_0) \right] + \frac{r_{\text{к}}}{n} =$$

$$= \left[0,2 \cdot 30 \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{10}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{10}\right)} + \frac{15,62}{10} \right] \cdot \left[1 + 0,004(63,8 - 35) \right] + \frac{10,91}{10} = 3,32 \text{ мОм.}$$

Далее по выражению (5) определим потери активной мощности:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_{\text{ш}}^2 \cdot R_{\text{ш}} = 3 \cdot 180^2 \cdot 3,32 \cdot 10^{-3} = 322,25 \text{ Вт}$$

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Определение эквивалентного сопротивления магистральной цеховой сети

По формуле														
$I_{\text{ш}},$ А	$I_{\text{нш}},$ А	Сеч. S, мм ²	$r_{\text{э}20}$ мОм/м	k_3^2	θ_0 °С	$\theta_{\text{ж}}$ °С	$l_{\text{ср}}$ м	n	$I_{\text{н}},$ А	$I_{\text{э}},$ А	$r_{\text{э}}$ мОм	$r_{\text{к}}$ мОм	$R_{\text{эш}}$ мОм	ΔP Вт
180	250	35х5	0,2	0,64	35	63,8	20	10	25	32	7,81	10,91	3,32	322,25

Таким образом, для нашего случая эквивалентное сопротивление шинпровода $R_{\text{эш}} = 3,32 \text{ мОм}$. Потери активной мощности $\Delta P = 322,25 \text{ Вт}$.

Эквивалентное сопротивление и потери активной мощности магистральной схемы можно определить, используя номограммы. Для определения эквивалентного сопротивления по номограммам по оси абсцисс требуется отложить значение суммарной величины сечения шинпровода $(s \cdot n)$, и по кривой соответствующего коэффициента загрузки линии по оси ординат найти искомое значение.

Номограммы для определения эквивалентного сопротивления магистральных сетей показаны на рис.7–8.

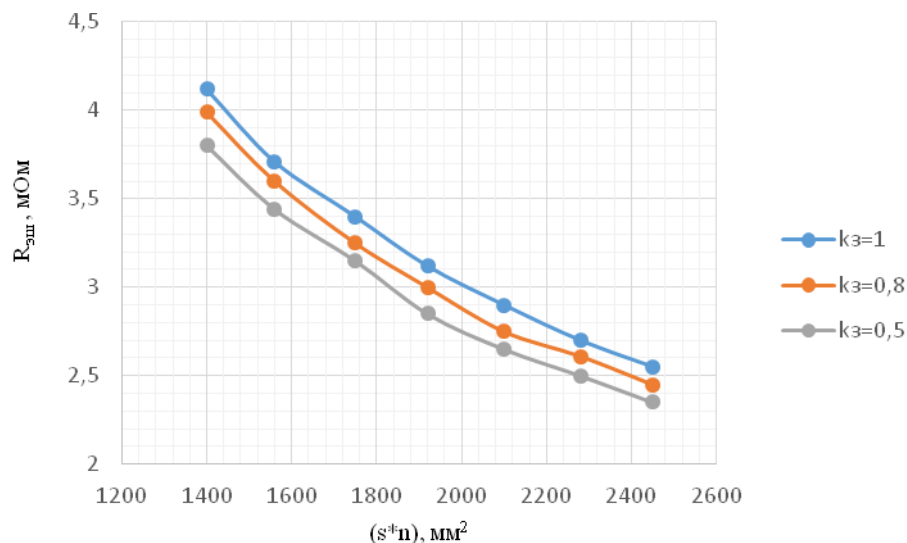


Рис. 7. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода ШРА-73 на номинальный ток 250А, со средней длиной 20 м и температурой окружающей среды 35 °С

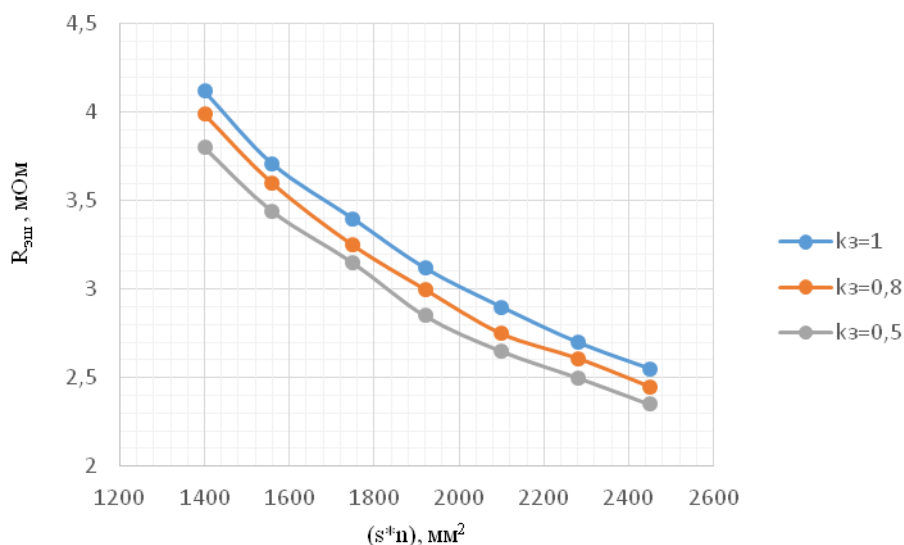


Рис. 8. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода ШРА-73 на номинальный ток 250А, со средней длиной 30 м и температурой окружающей среды 35 °С

Эквивалентное сопротивление, определенное по данным номограммам для приведенных исходных данных магистральных цеховых сетей, принимает значение $R_{эш} = 3,27$ МОм.

Потери активной мощности для данного эквивалентного сопротивления:

$$\Delta P_{ш} = 3 \cdot I_3^2 \cdot R_{эш} = 3 \cdot 180^2 \cdot 3,27 \cdot 10^{-3} = 317,84 \text{ Вт.}$$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше расчетов для магистральной сети. Примем расчет по формуле (5) за эталонный метод и определим относительную погрешность. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления и потерь мощности цеховой сети приведены в табл. 6.

Таблица 6

Погрешности результатов расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности магистральной цеховой сети

Метод расчета	Эквивалентное сопротивление $R_{э}$, МОм	Потери активной мощности ΔP , Вт	Погрешность расчета, %
По формуле	3,32	322,25	0
По номограммам	3,27	317,84	-1,5

В случае применения смешанных схем цеховых сетей требуется выделить радиальные и магистральные участки, определить эквивалентные сопротивления для радиального ($R_{эп}$) и магистрального ($R_{эм}$) участков и рассчитать эквивалентное сопротивление смешанной схемы:

$$R_{э(см)} = \frac{R_{эп} \cdot R_{эм}}{R_{эп} + R_{эм}}. \quad (7)$$

Заключение

Таким образом, результаты расчетов по представленному алгоритму подтвердили приемлемость применения номограмм для определения эквивалентного сопротивления

цеховых радиальных и магистральных сетей в функции таких параметров, как средняя длина, нагрузка и сечение линий сети, число коммутационных аппаратов на линии и температура окружающей среды.

Определение эквивалентного сопротивления цеховых сетей по разработанному алгоритму позволяет без снижения точности расчетов и трудоёмких вычислений оценивать величину потерь активной мощности и ЭЭ в низковольтных сетях любой топологии. При этом возможно, при изменении конфигурации схемы, корректировать вид зависимостей разработанных номограмм. Поэтому полученные результаты применимы для многократного практического применения с учетом изменения динамики схемы низковольтной цеховой промышленной сети.

Литература

1. Белашов В.Ю., Иванов В.О., Грачева Е.И. Составление и анализ балансов потребления электрической энергии промышленными предприятиями: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2003. 148 с.
2. Грачева Е.И., Иванов В.О., Денисова Н.В. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий и пути повышения надежности их работы: учебное пособие. Казань: КГЭУ, 2008. 271 с.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Уточнение величины эквивалентного сопротивления цеховых сетей // Надежность и безопасность энергетики. 2015. №3. С. 34–36.
4. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Шагидуллин А.В., Хаерова А.Н. 6. Моделирование законов изменения функциональных параметров низковольтных аппаратов // Надежность и безопасность энергетики. 2014. №3. С. 66–69.
5. Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследование показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 73–80.
6. Садыков Р.Р. Влияние режимных и схемных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №7-8. С. 92–97.
7. Волков Н.Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2003. 140 с.
8. Воропай Н.И. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие. Новосибирск: Наука, 2015. 206 с.
9. Киреева Э.А., Орлов В.В., Старкова Л.Е.. Электроснабжение цехов промышленных предприятий: учебное пособие. М.: Энергопрогресс, 2003. 119 с.
10. Конюхова Е.А., Киреева Э.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий: производственно-практическое издание. М.: Энергопрогресс, 2001. 92 с.
11. Шлейников В.Б. Электроснабжение цеха промышленного предприятия: учебное пособие. Оренбург: ЭБС АСВ, 2012. 115 с.
12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters // International Journal of Applied Research. 2015. №24.
13. Богданов Дж., Козин Ф.М. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: grachieva.i@bk.ru.

Садыков Руслан Рустемович – начальник отдела Приволжских электрических сетей филиала ОАО «Сетевая Коспания». E-mail: ru059@mail.ru.

Хуснутдинов Рустем Рауфович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: khrr@yandex.ru.

References

1. Belashov V.Yu., Ivanov V.O., Gracheva E.I. Compilation and analysis of the balances of electric energy industry: Textbooks. Kazan: KSPEU, 2003. 148 p.
2. Gracheva E.I., Ivanov V.O., Denisova N.V. Determination of power losses in low-voltage workshop networks of industrial enterprises and ways to improve the reliability of their work: textbooks. Kazan: KSPEU, 2008. 271 p.
3. Gracheva E.I., Naumov O.V. Specification of the value of the equivalent resistance of shop networks // Safety and Reliability of Power Industry. 2015. №3. Pp. 34–36.
4. Gracheva E.I., Safin A.R., Shagidullin A.V., Haerova A.N. Modeling of the laws of changing the functional parameters of low-voltage devices // Safety and Reliability of Power Industry. 2014. №3. Pp. 66–69.
5. Fedotov A.I., Gracheva E.I., Naumov O.V. Research of indicators of reliability of low-voltage switching devices of electric networks // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2013. №9-10. Pp. 73–80.
6. Sadykov R.R. Influence of regime and circuit parameters of electrical equipment on the equivalent resistance of shop networks // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2015. №7-8. Pp. 92–97.
7. Volkov N.G. Reliability of power supply: Textbooks. Tomsk: TPU. 2003. 140 p.
8. Voropai N.I. Reliability of power supply: Textbooks. Novosibirsk: Nauka, 2015. 206 p.
9. Kireeva E.A., Orlov V.V., Starkova L.E. Electrical supply of shops of industrial enterprises: Textbook. M.: Energoprogress, 2003. 119 p.
10. Konyhova E.A., Kireeva E.A. Reliability of power supply for industrial enterprises: production and practical publication. M.: Energoprogress, 2001. 92 p.
11. Shlennikov V.B. Electrical supply of shops of industrial enterprises: Textbook. Orenburg: EBS ASV, 2012. 115 p.
12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters // International Journal of Applied Research. 2015. №24.
13. Bogdanov J., Kozin F.M. Probabilistic models of damage accumulation. M.: Mir, 1989.

Authors of the publication

Elena I Gracheva – Doc. Sci. (Techn.), Prof, department «Power supply of industrial enterprises » (EPP) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Ruslan R Sadykov – Head of Department of Privolzhsky electrical networks, Branch of JSC "Grid Company".

Rustem R Khusnutdinov – PhD (physical&mathematical) Sci., Assoc. Prof., department «Power supply of industrial enterprises » (EPP) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Поступила в редакцию

20 апреля 2018 г.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПЛОТНОСТЕЙ ТОКА В ПРОВОДАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110-220 КВ

А.А. Геркусов, Е.И. Габдулвалиева

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ)

Резюме: В настоящей работе приводятся применяемые на сегодняшний день методики выбора сечений проводов воздушных линий электропередачи с учётом не только нагрузочных потерь, но и потерь на корону в линейной изоляции ВЛ. Рассматривается метод экономической оптимизации электрических нагрузок и плотностей тока в действующих ВЛ, где в качестве целевой функции выступают удельные дисконтированные затраты на передачу одного кВт·ч электроэнергии.

Ключевые слова: Электроэнергетические системы, плотность тока, сечения проводов, затраты, потери на корону, дисконтирование, линии электропередачи, изоляция.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-25-33

Для цитирования: Геркусов А.А., Габдулвалиева Е.И. Экономическая коррекция плотностей тока в проводах действующих воздушных линиях 110-220 Кв // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 25-33. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-25-33.

ECONOMIC CORRECTION OF CURRENT DENSITIES IN THE WIRES OF THE EXISTING OVERHEAD LINES OF 110-220 KV

A.A Gerkusov. E. I. Gabdulvalieva

Kazan national research technical University A. N. Tupolev-KAI (KNRTU-KAI)

Abstract: In this article, we present the methods used to date, the choice of the cross-sections of the wires of overhead transmission lines, taking into account not only the losses from the load currents, but also the corona losses and linear insulation of overhead transmission lines. The method of economic optimization of electrical loads and current density in operating air lines is considered, where the target functions are the specific discounted costs for transmission of 1 kW. h of electric power

Keywords: Electric power systems, current density, wire sections, costs, losses on the crown, discounting, power lines, isolation.

For citation: A.A. Gerkusov. E.I. Gabdulvalieva Economic correction of current densities in the wires of the existing overhead lines of 110-220 kV // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 25-33. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-25-33.

Одним из основных направлений научно-технического прогресса в электроэнергетике является создание и освоение энергосберегающих технологий, в том числе осуществление мероприятий по снижению расхода электроэнергии на её транспорт и затрат на её передачу в электрических сетях энергосистем.

Воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), обеспечивающие транспорт электроэнергии от источников мощности до потребителей, являются важнейшими элементами электроэнергетических систем и систем электроснабжения, а сечение проводов – важнейший параметр линии электропередачи. С увеличением сечения проводов линии возрастают затраты на её сооружение и отчисления от них. Одновременно уменьшаются потери электроэнергии и стоимость их за год. До недавнего времени при проектировании электрических сетей, для сопоставления разрабатываемых проектных вариантов схемы, параметров сети и отдельных её элементов, в качестве функции цели использовалась функция приведённых затрат $Z(F)$:

$$Z(F) = I + E_n \times K + Y, \quad (1)$$

минимуму которой соответствует некоторое оптимальное решение конкретной инженерной задачи [1-3].

Здесь $E_n=0,12 \text{ год}^{-1}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, являющийся достаточно стабильной во времени величиной, определяемой состоянием экономики страны и устанавливаемой её высшими экономическими и плановыми органами; K – единовременные капиталовложения в сооружаемые объекты; I – ежегодные эксплуатационные издержки; Y – народнохозяйственный ущерб от перерывов электроснабжения.

Сечения проводов ЛЭП должны быть выбраны таким образом, чтобы они соответствовали оптимальному соотношению между капитальными затратами на сооружение линии, растущими с увеличением сечения, и расходами, связанными с потерями энергии, уменьшающимися при увеличении сечений. Определение этого оптимального соотношения – весьма сложная задача, которая сводится к нахождению сечения провода, соответствующего наименьшим приведенным или суммарным дисконтированным затратам. Введение рынка электроэнергии также предполагает в качестве повышения конкурентоспособности энергоснабжающих организаций снижение собственных издержек на транспорт электроэнергии. Выбор экономически обоснованных сечений проводников и длин воздушных линий электропередачи способствует этому.

Основными методиками, служащими в практике проектирования для выбора оптимального сечения проводов в линиях межсистемных связей, являются *метод экономической плотности тока и метод экономических токовых интервалов*.

Эти методики основаны на минимизации функции приведенных затрат (1), одной из составляющих которой является экономический ущерб Y , возникающий от перерывов в электроснабжении. Поскольку показатели надёжности сталеалюминевых проводов всех марок приблизительно одинаковы, а сравниваемые варианты исполнения проектируемой ЛЭП различаются только сечением, то такие варианты считаются равнонадёжными, и составляющую ущерба в расчётах допустимо не учитывать.

В регламентируемой [1, 4, 10] методике выбора сечения проводов и жил кабелей по экономической плотности тока отсутствуют конкретные рекомендации по определению той расчетной токовой нагрузки, по которой следует определять расчётное сечение, кроме общего указания о *необходимости учёта перспективы развития* на срок не менее пяти лет. Наибольшее применение, в силу своей простоты, в практике проектирования нашёл подход, закрепленный в работах [4–6, 10], где выбор сечения осуществляется по некоторому фиктивному значению расчетного тока, учитывающему прогнозируемое изменение нагрузки линии после ввода в эксплуатацию, путём введения поправочного коэффициента α_i (называемого коэффициентом динамики роста нагрузки) к наибольшему току на пятый год эксплуатации $I_{нб}(5)$, принятому в качестве базисного:

$$I_{\text{расч}} = \alpha_i \times I_{\text{нб}(5)}. \quad (2)$$

Выбор $I_{\text{нб}(5)}$ в качестве базисного определяется сложившейся практикой проектирования схем развития электрических сетей и рекомендациями [4, 5]. Как правило, более обоснованно значения перетоков мощности по линии могут быть спрогнозированы лишь на первые пять лет её эксплуатации. Изменения нагрузки за пределами этого срока могут быть оценены лишь ориентировочно. Вместе с тем, анализ, проведенный в ряде работ [5-7], показывает, что нагрузка линии электропередачи 110–220 кВ достигает своего проектного значения, в среднем, за три года, причем начальная нагрузка линии составляет приблизительно 45% от расчётной. На современном этапе такого рода анализ не производился, поэтому при определении расчетной нагрузки ЛЭП *следует рассматривать различные варианты изменения нагрузки*, отличающиеся характером и темпами роста за определенный расчетный период.

Классический приём технико-экономического сопоставления сравниваемых вариантов проектируемых объектов и их режимов работы, различающихся по производительности, – это использование удельных показателей, рассчитанных на единицу объёма продукции. Применим этот подход для сопоставления токовых нагрузок ЛЭП при заданном сечении проводов, для чего рассчитаем удельные дисконтированные затраты на передачу 1 кВт·ч электроэнергии по ЛЭП любого класса напряжения и назначения:

$$Z_{\text{уд, д}} = \frac{Z_{\text{д}}}{\sum_{t=0}^{T_p} W_t (1 + E_{\text{ср}})^{-t}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{д}}$ – дисконтированные затраты за период T_p строительства и эксплуатации ЛЭП, руб; W_t – отпуск электроэнергии по годам расчётного периода, кВт·ч; $E_{\text{ср}}$ – норма дисконтирования.

С учётом нагрузочных потерь электроэнергии, потерь на корону и в линейной изоляции выражение (3) для ВЛ единичной длины примет вид:

$$Z_{\text{уд, д}} = \frac{K_0 + \left[\sum_{t=0}^{50} \left(p_{\text{об,рем}} K_0 + 0,003 I_{\text{нб}}^2 r_0 \tau \Pi + 8760 \Delta P_{\text{кор}} \Pi + \frac{U_{\text{н}}^2 T_{\text{вл}} N_{\text{гир}}}{3 \times N_{\text{из}} R_{\text{из}}} \Pi \right) \times (1 + E_{\text{ср}})^{-t} \right]}{\sum_{t=0}^{50} \sqrt{3} U_{\text{н}} I_{\text{нб}} T_{\text{нб}} \cos(f) \times (1 + E_{\text{ср}})^{-t}} \quad (4)$$

или

$$Z_{\text{уд, д}} = \frac{K_0 + \left(p_{\text{об,рем}} K_0 + 0,003 I_{\text{нб}}^2 r_0 \tau \Pi + 8760 \Delta P_{\text{кор}} \Pi + \frac{U_{\text{н}}^2 T_{\text{вл}} N_{\text{гир}}}{3 \times N_{\text{из}} R_{\text{из}}} \Pi \right) \times D}{\sqrt{3} U_{\text{н}} I_{\text{нб}} T_{\text{нб}} \cos(f) \times D}, \quad (5)$$

где K_0 – удельные капиталовложения в сооружение воздушных линий, р/км; $\Delta P_{\text{кор}}$ – удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, кВт/км; $p_{\text{об,рем}}$ – амортизационные отчисления на обслуживание и ремонт ВЛ; $I_{\text{нб}}$ – максимальный ток нагрузки линии, А; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение линии, кВ; r_0 – удельное сопротивление линии, Ом/км; $T_{\text{вл}}$ – среднее число часов влажной погоды в году, ч; $R_{\text{из}}$ – сопротивление одного

подвешенного изолятора в гирлянде, Ом; $N_{из}$ – число изоляторов в гирлянде, шт; $N_{гир}$ – число гирлянд на 1 км ВЛ, шт/км; Π – принятый средневзвешенный тариф на электроэнергию, р/кВт.ч; D – дисконтирующий множитель, представляющий собой безразмерную величину, определяемую по выражению

$$D = \frac{1 - (1 + E_{ср})^{-t}}{E_{ср}}; \quad (6)$$

$\cos(f)$ – коэффициент мощности; $T_{нб}$ – число часов использования максимума нагрузки, ч; τ – время максимума потерь, ч, определяемое по следующему эмпирическому выражению (формула Кезевича):

$$\tau = (0,124 + 10^{-4} T_{нб})^2 \times 8760. \quad (7)$$

Следовательно, выражения (4) и (5) представляют собой дискретную технико-экономическую модель сооружаемой ЛЭП и определяют зависимость удельных дисконтированных затрат на передачу 1 кВт.ч электроэнергии: от номинального напряжения ЛЭП U_n ; максимального тока нагрузки линии $I_{нб}$; числа часов использования максимума нагрузки $T_{нб}$; сечения и конструкции фазы; района прохождения трассы линии по гололёдности и СЗА; нормы дисконта $E_{ср}$; тарифа на электроэнергию Π и других технико-экономических параметров как самой ЛЭП, так и режима её работы, концентрируя, таким образом, учёт большого числа данных, изменяя которые можно добиться «настройки» рассматриваемой линии на режим передачи электроэнергии с минимальными относительными дисконтированными затратами.

В приведенных выражениях составляющие, входящие в числитель выражения $0,003 \times I_{нб}^2 \times r_0 \times \tau \times \Pi$; $8760 \times \Delta P_{кор} \times \Pi$; $\frac{U_n^2 T_{вл} N_{гир}}{3 \times N_{из} R_{из}} \Pi$, представляют собой, соответственно, стоимости нагрузочных потерь ЛЭП, потерь на корону и потерь в подвесной изоляции линии [8].

Взяв в выражении (5) 1-ю производную $dZ_{д.уд}/dI$, приравняв её к нулю и решая полученное уравнение относительно $I_{нб}$, получаем оптимальный ток нагрузки $(I_{нб}^{опт})'$, соответствующий минимальным удельным дисконтированным затратам, который является *током минимальных затрат*:

$$(I_{нб}^{опт})' = \sqrt{\frac{\left(\frac{K_0}{D \times U_n} \right) + \left(\frac{8760 \times \Delta P_k \times \Pi}{U_n} \right) + \left(\frac{K_0 \times p_{об,рем}}{U_n} \right) + \left(\frac{U_n^2 T_{вл} N_{гир}}{3 \times N_{из} R_{из}} \Pi \right)}{\left(\frac{0,003 \times r_0 \times \Pi \times \tau}{U_n} \right)}}. \quad (8)$$

Далее, на основании рассчитанных на ЭВМ значений $(I_{нб}^{опт})'$ и согласно принятым стандартным сечениям проводов, определяем *корректированную плотность тока* $J_{кор}$ в проводах воздушных линий по формуле

$$J_{кор} = \frac{(I_{нб}^{опт})'}{F_{эк}}, \quad (9)$$

где $F_{эк}$ – выбранное экономическое сечение действующей линии. По результатам проведенных расчетов строим графические зависимости $J_{кор} = f(T_{нб})$ – рис. 1, 2.

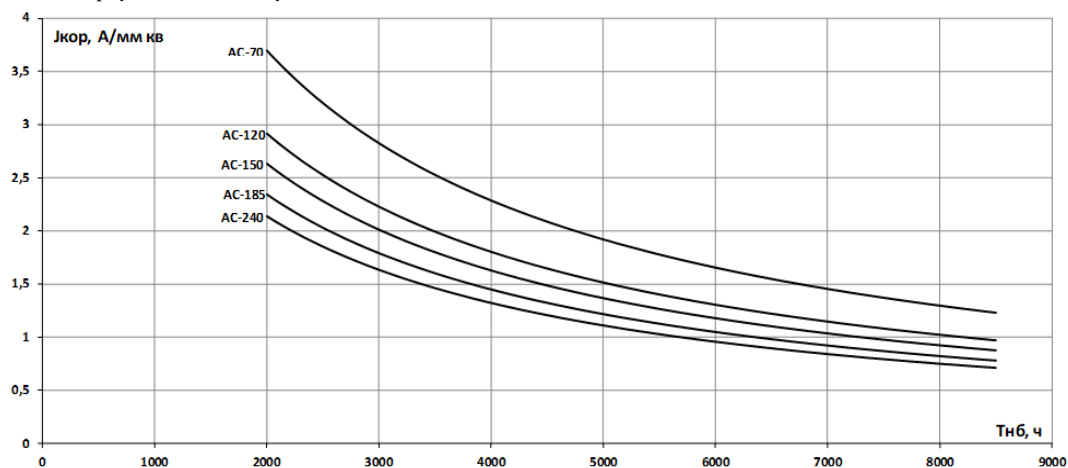


Рис. 1. Зависимость экономически оптимальной плотности тока $J_{кор}$ в проводах ВЛ-110кВ, сооружаемой на ж.б. опорах в 1-м и 2-м районах гололедности и 3-м районе по СЗА от продолжительности использования максимума нагрузки $T_{нб}$, ч.

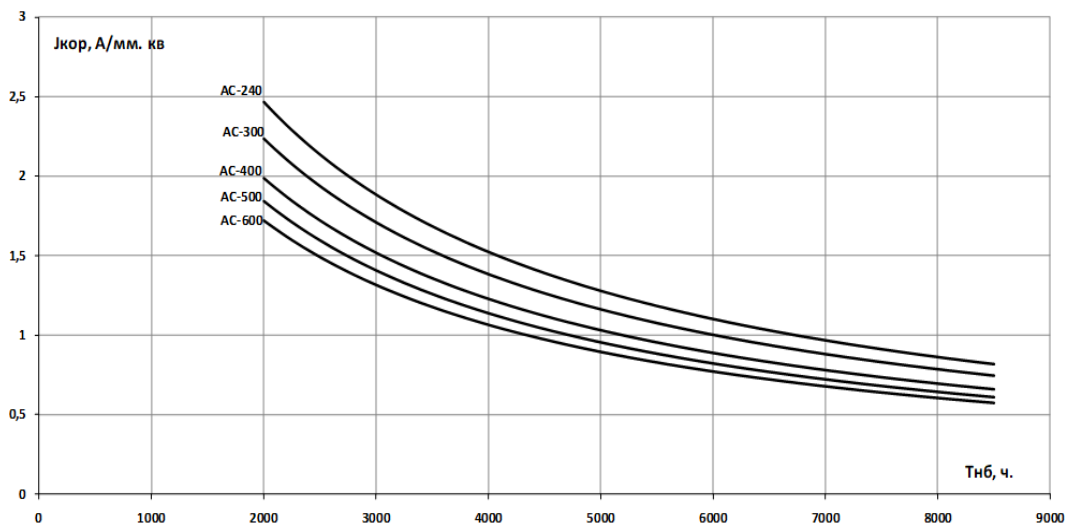


Рис. 2. Зависимость экономически оптимальной плотности тока $J_{кор}$ в проводах ВЛ-220 кВ, сооружаемой на ж.б. опорах в 1-м и 2-м районах гололедности в 3-м районе по СЗА от продолжительности использования максимума нагрузки $T_{нб}$.

Подставляя значение $(I_{нб}^{опт})'$ в выражение (5), получаем оптимизированные значения удельных дисконтированных затрат на передачу 1 кВт·ч электроэнергии по ВЛ-110-220 кВ. По результатам проведенных на ЭВМ расчетов строим зависимости $З_{д. уд. опт.} = f(T_{нб})$ (рис. 3, 4), из которых следует, что с увеличением плотности графика нагрузки и сечения проводов F величина $З_{д. уд. опт.}$ снижается. Это связано со снижением уровня нагрузочных потерь и потерь на корону в линии. Сравнительный анализ построенных зависимостей показывает, что удельные дисконтированные затраты в линию 110 кВ в среднем на 10–12% выше затрат в ВЛ-220 кВ. Тем не менее, оснований для отказа от сооружения линий напряжением 110 кВ и ниже нет, так как напряжение линии определяется не только экономическими, но и её техническими параметрами, и прежде всего: её назначением, полной длиной, пропускной способностью, передаваемыми объемами электроэнергии, напряжением прилегающей энергосистемы.

Таким образом, зависимости $J_{кор} = f(T_{нб})$ позволяют, в весьма широких пределах, корректировать плотности тока для уже действующих линий с выбранным сечением проводов. Это приводит к снижению удельных дисконтированных затрат на передачу электроэнергии и оптимизации рабочего режима линии, что следует из приведенного ниже примера.

Воздушная линия, номинальным напряжением 220 кВ, сооружённая с применением фазных проводов марки АС-400, проходит во 2-м районе гололёдности и 3-м районе по СЗА. Число часов использования максимума нагрузки принято 2000, 4000 и 7000 ч; ток максимума нагрузки $I_{нб}$ варьируется от 100 до 1000 А, в связи с чем меняется и плотность тока в проводах ВЛ; среднее число часов влажной погоды в году $T_{вл} = 492$ ч, [9], сопротивление одного подвесного изолятора в гирлянде $R_{из} = 915$ кОм; число изоляторов в гирлянде $N_{из} = 16$ шт; число гирлянд на 1 км ВЛ $N_{гир} = 9,8$ шт/км; удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ; $\Delta P_{кор} = 0,924$ кВт/км [8]; принятый средневзвешенный тариф на электроэнергию $\Pi = 2$ р/кВт.ч; дисконтирующий множитель $D = 9,9148$.

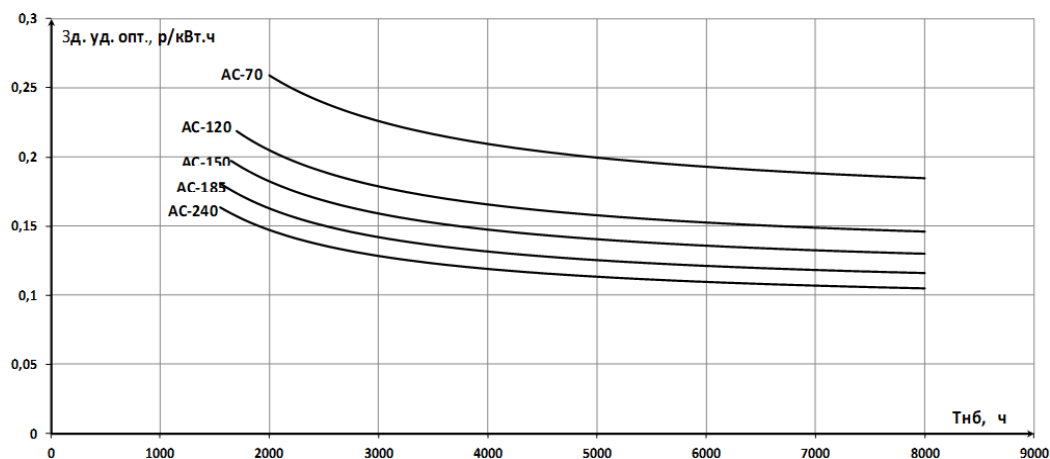


Рис. 3. Зависимости дисконтированных удельных оптимизированных затрат на передачу электроэнергии по ВЛ-110 кВ, развернутой длиной 80 км, проходящей в 1-м и 2-м районе гололедности и 3-м районе по СЗА от числа использования максимума нагрузки.

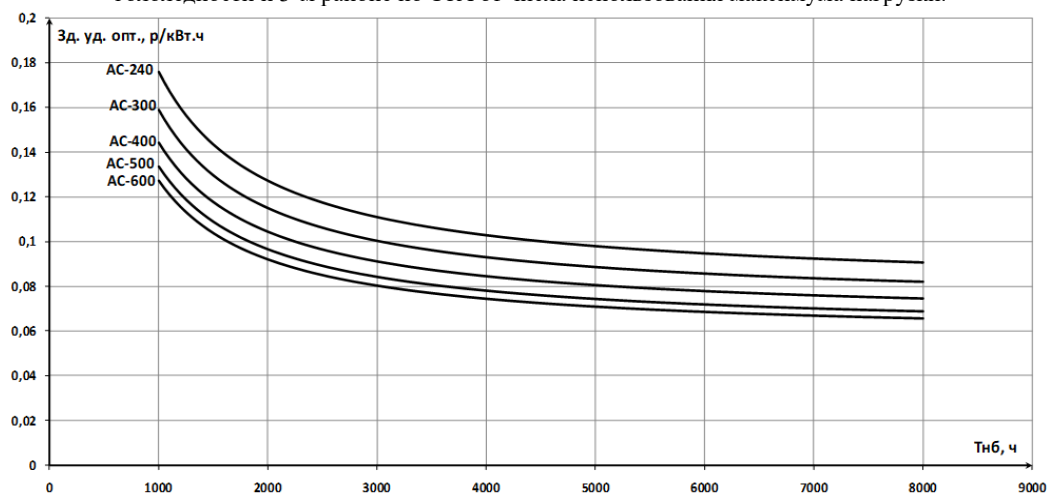


Рис. 4. Зависимость дисконтированных удельных оптимизированных затрат на передачу электроэнергии по ВЛ-220 кВ, развернутой длиной 120 км, проходящей в 1-м и 2-м районе гололедности и 3-м районе по СЗА от числа часов использования максимума нагрузки.

Сравним удельные дисконтированные затраты на передачу 1 кВт·ч электроэнергии с нормированной в ПУЭ экономической плотностью тока и при передаче электроэнергии с оптимизированной по выражению (9) плотностью тока. Из приведенных на рис. 5 зависимостей $Z_{уд.д.}/Z_{опт}=f(I_{нб})$ следует, что при передаче электроэнергии по линии с токовой нагрузкой $I_{нб}$ (а следовательно, и плотностью тока), отличной от оптимальной, удельные дисконтированные затраты на передачу электроэнергии значительно превышают удельные оптимизированные затраты как для слабозагруженных линий с низкой плотностью графика, так и для линий с полной загрузкой по току, создавая, таким образом, экономически неоптимальный рабочий режим работы ЛЭП. Для линий с невысокими плотностями графиков рекомендуется более значительная нагрузка по току максимума, чем для линий с более плотными графиками, так как для таких линий, даже при токах, значительно превышающих $(I_{нб}^{опт})'$, увеличение удельных дисконтированных затрат по отношению к минимальным не превышает единиц процентов (кривая 1, рис. 5).

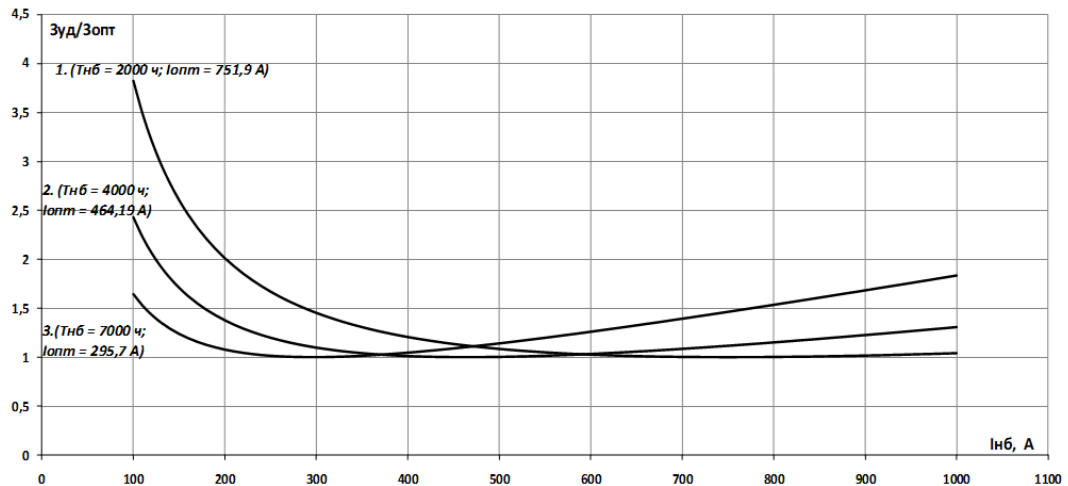


Рис. 5. Зависимость отношения удельных дисконтированных затрат на передачу 1 кВт·ч. электроэнергии при свободно варьируемой $I_{нб}$ к удельным дисконтированным затратам при оптимальном $I_{нб}$ от наибольшего тока нагрузки, для ВЛ-220 кВ, выполненной проводом АС-400 и проходящей в 1-м, 2-м районе гололедности и 3-м уровне СЗА.

Для «настройки» действующей ВЛ на экономически оптимальный по току нагрузки рабочий режим рекомендуется, путём соответствующего выбора оперативной схемы узловых подстанций, конфигурации сети, состава включённого оборудования, регулировать потоки мощности по ЛЭП таким образом, чтобы ток нагрузки соответствовал $(I_{нб}^{опт})'$ или отличался от него в пределах экономической погрешности (не более 5%).

Другими способами регулирования передаваемой по ЛЭП активной мощности являются:

- применение устройств И.Р.М. (источников реактивной мощности) в виде конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов, подключаемых к сборным шинам подстанций и реакторов, подключаемых к приёмному концу ЛЭП через выключатель;
- применение устройств продольной компенсации реактивных параметров ЛЭП;
- включение фазоворотных устройств (ФПУ), позволяющих изменять величину угла фазового сдвига δ между напряжением источника и потребителя и, следовательно, управлять потоком электроэнергии [5].

Для более полной реализации рассмотренной методики предлагается построить технико-экономическую модель ЛЭП на основании удельных дисконтированных затрат с учётом наличия на приёмных подстанциях компенсирующих устройств реактивной мощности, а также для ЛЭП повышенной натуральной мощности.

Выводы

1. Построенная на основании удельных дисконтированных затрат экономико-математическая модель ЛЭП связывает проектные технические параметры ЛЭП с режимами её эксплуатации и позволяет проводить технико-экономическое сравнение вариантов сооружения ЛЭП, различающихся номинальными напряжениями, объёмами передаваемой электроэнергии и другими базовыми показателями.

2. Предлагаемая методика позволяет выбрать наиболее экономически оптимальный режим эксплуатации воздушной линии электропередачи.

3. Оптимизированная плотность тока зависит от номинального напряжения и сечения фазных проводов ЛЭП и имеет более широкий диапазон изменения по сравнению с экономической плотностью тока, регламентируемой в ПУЭ.

Литература

1. Таратин В.А. Стратегическое планирование в энергетике: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2013. 101 с.
2. Барановский А.И., Кожевников Н.Н., Пирадова Н.В. и др. Экономика промышленности. Т. 1. Общие вопросы экономики. М.: Издательство МЭИ, 1997. 696 с.
3. Барановский А.И., Кожевников Н.Н., Пирадова Н.В. и др. Экономика промышленности. Т. 2. Экономика и управление энергообъектами. М.: Издательство МЭИ, 1998. 296 с.
4. Зуев Э.Н. К вопросу об экономической плотности тока в современных условиях // Электро. 2000. № 1. С. 44–47.
5. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М.: Издательство МЭИ, 2012. 335 с.
6. Федотов А.И., Геркусов А.А., Абдуллазянов Э.Ю. Экономические основы выбора сечений проводов и кабелей в рыночных условиях / Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. № 11-12. С. 87–100.
7. Зуев Э.Н. К вопросу об экономической плотности тока в современных условиях. Электро. 2000. № 1. С. 44–47.
8. Геркусов А.А. Макаров В.М. Техничко-экономическое обоснование выбора параметров и режимов работы проектируемых линий электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 66–73.
9. Александров Г.Н. и др. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения. СПб.: Энергоатомиздат, 1993. 560 с.
10. Геркусов А.А. Анализ методик для выбора сечений проводов воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. N3(202). С. 131–138.

Авторы публикации

Геркусов Алексей Анатольевич – канд. техн. наук, преподаватель Зеленодольского института машиностроения и информационных технологий (филиал КНИТУ-КАИ).

Габдувалиева Екатерина Ивановна – преподаватель Зеленодольского института машиностроения и информационных технологий (филиал КНИТУ-КАИ).

References

1. Taratin V.A. Strategic planning in the energy sector: Textbook. Saint-Petersburg: Polytechnical University publishing house, 2013. 101p.
2. Baranovskiy A.I., Kozhevnikov N.N., Piradova N. In., etc. Economy of industry. vol.1. General issues of the economy. M.: Publishing MEI, 1997. 696 p.
3. Baranovskiy A.I., Kozhevnikov N.N., Piradova N.In. etc. Economy of industry. vol. 2. Economy and management of power facilities. M.: Publishing house of MPEI, 1998. 296 p.

© *А.А. Геркусов, Е.И. Габдулвалиева*

4. Zuev E.N. On the issue of economic current density in modern conditions.// Electro. 2000. No. 1. P. 44–47.
5. Belov P.A., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Managing flows of electricity and improving the efficiency of electric power systems. Moscow : Publishing house of MEI, 2012. 335 with.
6. Fedotov A.I., Gerkusov A.A., Abdullazyanov E.Yu. Economic basis for the selection of sections of wires and cables in market conditions //Proceedings of universities. Energy problem. 2001. № 11-12. S. 87–100.
7. Zuev E.N. On the issue of economic current density in modern conditions.// Electro. 2000. No. 1. P. 44–47.
8. Gerkusov A.A. Makarov V.M. Techno-economic justification of the choice of parameters and modes of operation of the designed power transmission lines // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2016. No.2. C. 66–73.
9. Aleksandrov G.N. et al. Design of ultrahigh voltage transmission lines. SPb.: Energoatomizdat, 1993. 560 p.
10. Gerkusov A.A. Analysis of methods for selection of sections of wires of overhead power lines // Scientific and technical sheets. SPbGPU. 2014. N3 (202). C. 131–138.

Authors of the publication

Aleksey A Gerkusov – PhD tech. sciences, teacher Zelenodolsk Institute of mechanical engineering and information technologies (Branch of KAZAN state technical University).

Ekaterina I Gabduvalieva – teacher Zelenodolsk Institute of mechanical engineering and information technologies (Branch of KAZAN state technical University).

Поступила в редакцию

10 апреля 2018 г.



СТЕПЕНЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В.К. Козлов, А.Х. Сабитов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
sabitov_ah@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты исследований и анализа литературных данных термического старения бумажной изоляции. Установлено экспоненциальное снижение степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения: в начальный момент времени скорость старения бумажной изоляции максимальна, затем происходит ее замедление. Выявлено, что степень полимеризации в начальный момент эксплуатации трансформатора может находиться в пределах 900 единиц, это обусловлено его сушкой в процессе изготовления.

Ключевые слова: степень полимеризации, единица, сушка, старение, бумажная изоляция.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38

Для цитирования: Козлов В.К., Сабитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 34-38. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38.

THE DEGREE OF POLYMERIZATION OF POWER TRANSFORMERS' PAPER INSULATION

V.K. Kozlov, A. Kh. Sabitov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sabitov_ah@mail.ru

Abstract: The paper presents the results of research and analysis of literature data on the paper insulation's thermal aging. An exponential decrease in the degree of polymerization of paper insulation from the aging time is established, at the starting time of transformers' operation the aging rate of paper insulation is maximal and after that its slowing down. It was found out that the degree of polymerization at the starting time of the transformer's operation can be in the range of 900 units, this is due to its drying during the manufacturing process.

Key words: degree of polymerization, unit, drying, aging, paper insulation.

For citation: V.K. Kozlov, A. Kh. Sabitov The degree of polymerization of power transformers paper insulation // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 34-38. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-34-38.

Срок службы изоляционной системы трансформаторов определяется сроком службы бумажной изоляции, который, в основном, рассчитывается в результате определения степени полимеризации. Согласно СТО 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для оценки состояния бумажной изоляции требуется проводить исследование растворенных в масле фурановых соединений РД 34.43.206-94, а также определять степень полимеризации бумаги. Существующие химические методы определения степени полимеризации бумаги предусматривают отбор образца изоляции с последующим его исследованием в химической лаборатории согласно "Методическим указаниям по оценке состояния бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов по степени полимеризации" (утверждены РАО "ЕЭС России" от 13.12.2007г.) в Российской Федерации и МЭК 60450 – в мире. В соответствии с требованиями СТО 56947007-29.180.091-2011 ОАО «ФСК ЕЭС» степень полимеризации исходной намоточной бумаги обмоток должна быть не менее 1250 единиц. У ответственных трансформаторов напряжением 35 кВ и выше, отработавших установленные нормативно-технической документацией сроки (блочных трансформаторов, трансформаторов собственных нужд), оценка состояния бумажной изоляции обмоток по степени полимеризации и определение фурановых соединений проводится при комплексных диагностических обследованиях. При нормальном состоянии изоляции степень полимеризации находится в пределах 800–600 единиц [1, 2]. Ресурс бумажной изоляции обмоток считается исчерпанным при снижении степени полимеризации бумаги до 250 единиц и менее. Опыт эксплуатационных организаций показывает, что коэффициент полимеризации порядка 200 соответствует непригодной к работе изоляции. Новая изоляция имеет коэффициент полимеризации порядка 1000–1200 [1].

Проведенные в работах [3, 4] теоретические исследования разложения маслопропитанной целлюлозной электротехнической изоляции позволили дать объяснение замедлению процесса старения со временем. В первоначальный момент старения в бумажной изоляции снижение степени полимеризации происходит резко, далее скорость процесса уменьшается. Снижение средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы происходит тем интенсивнее, чем выше температура [3]. Зависимость средней степени полимеризации макромолекул целлюлозы от времени старения [5] показывает, что за первые двое суток степень полимеризации уменьшается с 900 до 400, а за последующие 16 суток – лишь с 400 до 200.

Для исследования нами была использована бумажная изоляция. Для ускорения процесса старения 80 листов этой бумаги прогревались при температуре 80 ± 15 °С в атмосферных условиях. Через каждый час вынималось по 5 листов бумаги. Таким образом было получено 8 групп образцов с выдержкой в печи от 0 до 8 часов. Далее химическим методом определяли их степень полимеризации. Результаты исследований представлены в таблице.

Таблица

Степень полимеризации и время старения 8 образцов бумажной изоляции

№ образца	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Время старения, ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Степень полимеризации, ед.	584	524	441	417	410	328	282	272	223

По полученным значениям построили график изменения степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения.

Полученная зависимость подтверждает экспоненциальное изменение степени полимеризации бумажной изоляции и подтверждает результаты ранее проведенных

исследований [5, 6]. Экспоненциальное снижение степени полимеризации при температурном старении подтверждается и зарубежными исследователями [7].

Согласно ГОСТ 14209-97 температура наиболее нагретой точки обмотки соответствует 98 °С. При превышении этого значения интенсивность изменения температуры подчиняется известному, как 6-градусное, правилу: увеличение температуры изоляции на 6 °С сокращает срок ее службы вдвое [8, 9].

На отечественных трансформаторных заводах для сушки активной части силовых трансформаторов 35–110 кВ используются как метод сушки горячим воздухом, так и сушка в парах нефтепродуктов.

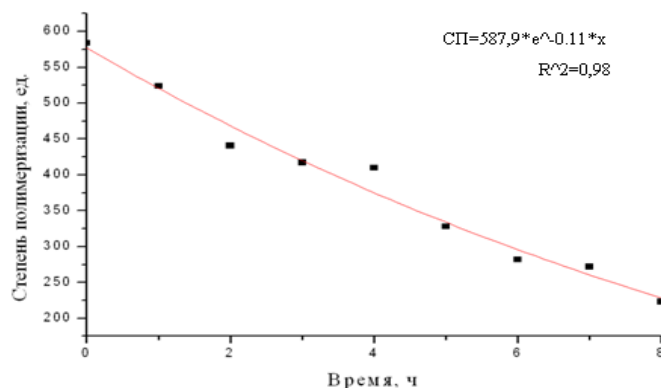


Рис. Изменение степени полимеризации бумажной изоляции от времени старения

Несмотря на утверждение, что степень полимеризации бумажной изоляции в первоначальном состоянии находится в пределах от 1000 до 1250 единиц, с учетом последних требований эксплуатирующих организаций, следует обратить внимание на технологический процесс сушки активной части трансформаторов. Сушку изоляции производят во время изготовления трансформаторов, после ремонтных работ со вскрытием и при увлажнении изоляции трансформаторного оборудования.

Сушка активной части трансформаторов в паровой фазе с использованием насыщенных паров нефтепродуктов в качестве нагревающей среды позволяет быстрее прогреть изоляцию, особенно внутренние ее части, так как на нагревание идет не только тепло самих паров, но и теплота, выделяющаяся при конденсации углеводорода типа керосина. При сушке не происходит окисление изоляции (так как нагрев осуществляется парами органической жидкости), поэтому температура сушки может быть повышена до 135 °С без опасения порчи изоляции [10].

Расчетное значение степени полимеризации образцов бумаги снижается с начального значения 1000 до 200 при температуре 130 °С в течение 4 лет, при температуре 100 °С – в течение 20 лет; при температуре 80 °С старение в течение 50 лет вызывает снижение степени полимеризации до 360, т. е. изоляция остается работоспособной.

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что при термической обработке бумажной изоляции происходит резкое снижение степени полимеризации. Это подтверждает факт того, что на начальном этапе эксплуатации степень полимеризации бумажной изоляции трансформатора не может сохраняться до 1250 единиц. Согласно проведенному анализу можно констатировать, что исходное значение степени полимеризации бумажной изоляции после сушки трансформатора будет находиться в пределах 900 единиц.

Выводы

1. Проведен анализ результатов исследований различных авторов по снижению степени полимеризации бумажной изоляции при термическом старении.
2. Выявлен факт экспоненциального снижения степени полимеризации бумажной изоляции.
3. Степень полимеризации бумажной изоляции при существующем технологическом процессе изготовления и запуска в эксплуатацию трансформаторов не может составлять 1000 – 1250 единиц, его значение может находиться в пределах 900 единиц.

Литература

1. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: ЭНАС, 2002.
2. Ершов Б.Г. Измерение степени полимеризации бумажной изоляции силового оборудования в электроэнергетике и электроэнергетической промышленности / Б.Г. Ершов, В.Б. Комаров, Е.О. Лютько // Измерения в современном мире – 2013: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. С. 21–24.
3. Аракелян В.Г. Химия, механизмы и кинетика старения целлюлозных материалов. Часть I. Химия, механизмы и кинетика разложения целлюлозы // Электротехника. 2006. № 6. С. 29–38.
4. Козлов В.К., Сабитов А.Х., Низамутдинов Б.Р. Исследование процесса старения бумажно-масляной изоляции в видимом диапазоне / В.К. Козлов, А.Х. Сабитов, Б.Р. Низамутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 81–85.
5. Маслякова А.В. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02/ Маслякова Анна Вячеславовна. СПб., 2005. 204 с. [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-elektrofizicheskikh-kharakteristik-i-ustoichivosti-k-termostareniyu-tsellyulozoso> [Дата последнего обращения 1.12.17].
6. Дарьян Л.А. Маркеры старения бумажной изоляции. Корреляция степени полимеризации бумажной изоляции с концентрацией метанола в трансформаторном масле [Электронный ресурс] / Л.А. Дарьян // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С.15. Режим доступа: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11._Darjan_L.A._Markery_starenija_bumazhnoi_izoljacii.pdf. [Дата последнего обращения 4.12.17].
7. Mehta A.K., Sharma R.N., Chauhan S. Thermal aging of solid insulation under dual temperature variation. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 06.12.2016 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-16-24-6/elk-24-6-50-1411-23.pdf> [Дата последнего обращения 2.12.17].
8. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.:Энергоатомиздат, 1986.
9. Осотов В.Н. Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / В.Н. Осотов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С. 49. Режим доступа: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf [Дата последнего обращения 4.12.17].
10. Сушка активной части [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://silovoytransformator.ru/stati/sushka-aktivnoy-chasti.htm> [Дата последнего обращения 4.12.17].

Авторы публикации

Козлов Владимир Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сабитов Айдар Хайдарович – магистр техники и технологии, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Alekseev B.A. The monitoring of the status (diagnostics) of large power transformers. М.: ENAS, 2002.
2. Ershov B.G. Measurement of polymerization's degree of power equipment's paper insulation in the electrical power engineering and electric power industry / B.G. Ershov V.B., Komarov, E.O. Lyutko // Measurements in the modern world - 2013: a collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg.: Publishing house Polytechnic. University, 2013. P. 21–24.
3. Arakelyan V.G. Chemistry, mechanisms and kinetics of aging of cellulosic materials. Part I. Chemistry, mechanisms and kinetics of cellulose decomposition // Electrical Engineering. 2006. № 6. P. 29–38.
4. Kozlov V.K, Sabitov A.Kh., Nizamutdinov B.R. Research of aging process of paper-oil insulation in the visible range / V.K. Kozlov, A.Kh. Sabitov, B.R. Nizamutdinov // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2015. № 3-4. P. 81–85.
5. Maslyakova A.V. Increase of electrophysical characteristics and stability to thermo-aging of cellulose-containing dielectric by its modification with chitosan: dis. Cand. ... tech. Sciences: 05.09.02 / Maslyakova Anna Vyacheslavovna. St. Petersburg, 2005. 204 with. [Electronic resource] / Access mode: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-elektrofizicheskikh-kharakteristik-i-ustoichivosti-k-termostareniyu-tsellyulozoso> [Last references 1.12.17].
6. Dar'yan L.A. Aging's markers of paper insulation. Correlation of polymerization's degree of paper insulation with the concentration of methanol in transformer oil [Electronic resource] / L.A. Dar'yan // III Scientific-practical conference "Control of equipment's technical condition of power energy's objects". 2016. P. 15. Access mode: http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/11._Darjan_L.A._Markery_starenija_bumazhnoi_izoljacii.pdf [Last references 4.12.17].
7. Mehta A.K., Sharma R.N., Chauhan S. Thermal aging of solid insulation under dual temperature variation. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 06.12.2016 [Electronic resource] / Access mode: <http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-16-24-6/elk-24-6-50-1411-23.pdf> [Last references 2.12.17].
8. Neklepaev B.N. Electric part of power stations and substations. М.: Energoatomizdat, 1986.
9. Osotov V.N. Practical aspects of the evaluation of power transformers' actual service life [Electronic resource] / V.N. Osotov // III Scientific and Practical Conference "Control of equipment's technical condition of power energy's objects". 2016. P. 49. Access mode: http://www.ties.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf [Last references 4.12.17].
10. Drying the active part [Electronic resource] / Access mode: <http://silovoytransformator.ru/stati/sushka-aktivnoy-chasti.htm> [Last references 4.12.17].

Authors of the publication

Vladimir K Kozlov – Doc. Sci. (physical&mathematical), Prof., department «Electric power systems and grids», Kazan State Power Engineering University.

Aidar K Sabitov – master of engineering and technology, senior lecturer «Electric power systems and grids », Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

06 марта 2018 г.



ВЫБОР КРАТКОСРОЧНОЙ ФИКСИРОВАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

И.И. Голуб, О.Н. Войтов, Е.В. Болоев, Л.В. Семенова

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Иркутск, Россия

golub@isem.irk.ru

Резюме: Работа связана с изучением возможности выбора для заданного интервала изменения мощностей нагрузок и возобновляемых источников генерации такой постоянной конфигурации первичной распределительной сети, при которой потери энергии минимально отличаются от потерь при оптимальной часовой реконфигурации. Исследование проводилось с использованием разработанного авторами быстродействующего алгоритма реконфигурации первичной распределительной сети по критерию минимизации потерь. Эффективность алгоритма доказана сравнением полученных на его основе результатов с результатами других методов. При аварийном отключении секционного выключателя алгоритм реконфигурации, базирующийся на известных в теории графов методах, позволяет определить линейный выключатель, необходимый для восстановления режима. Для окончательного выбора таких выключателей производится проверка допустимости послеаварийного режима и выбор управлений, если условия допустимости не выполняются. Работа предлагаемых методов демонстрируется на примере 33 узловой схемы IEEE.

Ключевые слова: первичная распределительная сеть, реконфигурация, теория графов, постоянная конфигурация, потери энергии, возобновляемая генерация.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310438-1.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-39-51

Для цитирования: Голуб И.И., Войтов О.Н., Болоев Е.В., Семенова Л.В. Выбор краткосрочной фиксированной конфигурации распределительной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 39-51. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-39-51.

CHOICE OF SHORT-TERM CONSTANT CONFIGURATION OF THE DISTRIBUTION NETWORK

I.I. Golub¹, O.N. Voitov¹, E.V. Boloev¹, L.V. Semenova¹

¹Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia

golub@isem.irk.ru

Abstract: The work studies a possibility of choice for a given interval of changing the load

power and the capacity of renewable generation sources of such a constant configuration of the primary distribution network, at which the energy losses differ minimally from the losses at the optimal hourly reconfiguration. The study was carried out using the fast algorithm of the primary distribution network reconfiguration by the losses minimization criterion that was worked out by the authors. The algorithm efficiency is proved by comparing the results obtained on study basis with the results of other methods. After emergency cut-out of the sectionalizing switch the reconfiguration algorithm based on the methods known in the graph theory allow us to determine the line switch required for restoration. For the final choice of such switches feasibility of the post-emergency is tested and the controls are chosen, if the conditions are not met. The work of the proposed methods is demonstrated by the example of the 33 nodal IEEE scheme.

Keywords: primary distribution network, reconfiguration, graph theory, constant configuration, energy losses, renewable generation

Acknowledgments: The work is done in the framework of the project III.17.4.2. program of fundamental research SB RAS, registration number AAAA-A17-117030310438-1

For citation: I.I. Golub, O.N. Voitov, E.V. Boloiev, L.V. Semenova Choice of short-term constant configuration of the distribution network // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 39-51. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-39-51.

Введение

Реконфигурация первичной распределительной сети – важнейшее средство оптимизации ее топологии. Главным назначением реконфигурации является надежное электроснабжение потребителей, которое в первичной распределительной сети при аварийном отключении нормально замкнутого секционного выключателя производится включением нормально разомкнутого линейного выключателя, что обеспечивает работу слабо замкнутой первичной распределительной сети как разомкнутой. Другими критериями оптимальной реконфигурации могут быть минимизация потерь мощности (энергии), потерь напряжения, стоимости обслуживания сети и повышение ее пропускной способности.

Впервые реконфигурация, как метод снижения потерь мощности в городской распределительной сети, была предложена в работе [1]. С тех пор было разработано множество алгоритмов реконфигурации, которые, согласно [2], можно разбить на четыре группы, включающие: комбинацию эвристических и оптимизационных методов, только эвристические или мета эвристические методы, а также математические алгоритмы.

В предыдущих исследованиях [2], связанных с реконфигурацией для снижения потерь мощности, все выключатели полагались удаленно управляемыми, что не отвечает действительности, поскольку выключатели, используемые в традиционных первичных распределительных сетях, при реконфигурации переключаются вручную. Это не позволяет проводить частые переключения, и конфигурация большинства распределительных сетей в течение сезона долгое время остается постоянной. Переключения, позволяющие минимизировать потери, в этом случае могут быть реализованы, например, для режима максимальных или минимальных нагрузок.

При переходе к активным распределительным сетям переключаемые ручным способом выключатели должны быть заменены автоматическими или удаленно управляемыми, что позволит проводить реконфигурацию более часто в часовом, недельном, суточном, месячном или сезонном временном диапазоне. Удаленно управляемые выключатели важны и для оперативности восстановления электроснабжения после аварии

[3]. Негативным фактором, ограничивающим частоту проведения реконфигураций, является возникновение при переключениях переходных процессов и перенапряжений, отрицательно сказывающихся на надежности сети [4].

Главным препятствием, не позволяющим использовать для реконфигурации только удаленно управляемые выключатели, является их большая стоимость, ограничение числа допустимых переключений, а следовательно, и большая стоимость отдельного переключения. Согласно [5], стоимость удаленно управляемого выключателя составляет 4000 \$. При сроке его службы, равном 40 годам, максимально допустимое число операций по переключению равно 10 000 [6], что составляет 250 переключений в год, или около 5 переключений в неделю. Неоправданно большие затраты, необходимые для замены всех выключателей на выключатели, управляемые из центра управления оператором распределительной сети, делают актуальной задачу определения минимального числа выключателей, использующихся при реконфигурации сети [7].

В работе [8] для часовой реконфигурации распределительной сети, обеспечивающей минимальные суточные потери энергии, показано, что наличие возобновляемой генерации оказывает большее влияние на снижение потерь, чем реконфигурация, однако при введении возобновляемой генерации число переключений при реконфигурации существенно возрастает. Показана также возможность выбора такой конфигурации первичной распределительной сети, при которой потери энергии в течение суток будут близки к суточным потерям при оптимальной часовой реконфигурации. В данной работе эта идея распространяется на выбор такой постоянной конфигурации, при которой в течение недели с максимальной и недели с минимальной нагрузкой потери энергии будут близки к потерям при оптимальной часовой реконфигурации.

Для реконфигурации используется предложенный авторами алгоритм [9], основанный на известных в теории графов методах определения на графе сети максимального покрывающего дерева [10] и состава ветвей независимых контуров по их хордам [11], которым соответствуют нормально разомкнутые линейные выключатели. Алгоритм реконфигурации включен в быстродействующую программу расчета потоков распределения СДО-7 [12].

Информация о составе ветвей контуров, получаемая в процессе работы алгоритма реконфигурации, используется при выборе линейных выключателей, позволяющих не только обеспечить процесс восстановления режима после аварийного отключения секционного выключателя, но и ускорить этот процесс, особенно в том случае, если линейный выключатель является удаленно управляемым.

Статья организована следующим образом. В первом разделе рассматривается влияние оптимальной часовой реконфигурации на потери энергии в тестовой распределительной сети с источниками возобновляемой генерации и без них. Эти потери, как эталонные, сравниваются во втором разделе с потерями при выборе постоянной конфигурации распределительной сети. В третьем разделе для постоянной конфигурации распределительной сети решается проблема восстановления режима сети после аварийного отключения любого из секционных выключателей. Решается проблема оценки допустимости и обеспечения допустимости послеаварийного режима.

1. Потери энергии при реконфигурации

Для иллюстрации возможности выбора постоянной конфигурации распределительной сети и анализа факторов, оказывающих влияние на потери энергии в ней, используется 33 узловая схема [13] (рис. 1), включающая 32 секционных и 5 линейных выключателей. Данные о расчетных значениях нагрузок этой схемы взяты из работы

[13].

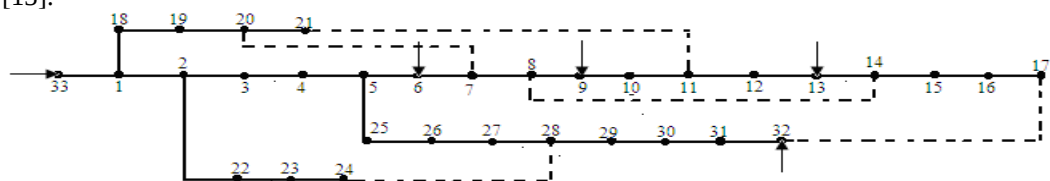


Рис. 1. Схема 33-узловой распределительной сети. Пунктирными линиями выделены ветви с линейными выключателями

На рис. 2 показаны профили часовых графиков с максимальными (рис. 2, *а*) и минимальными (рис. 2, *б*) недельными нагрузками, построенные на основе предложенных в работе [2] типовых графиков суточного изменения индустриальных, коммерческих и коммунальных нагрузок. Суточные графики часового изменения активной генерируемой мощности источников возобновляемой генерации в узлах 6, 9, 13, 32 (рис. 3), взятые из работы [2], для каждого дня недели полагались постоянными.

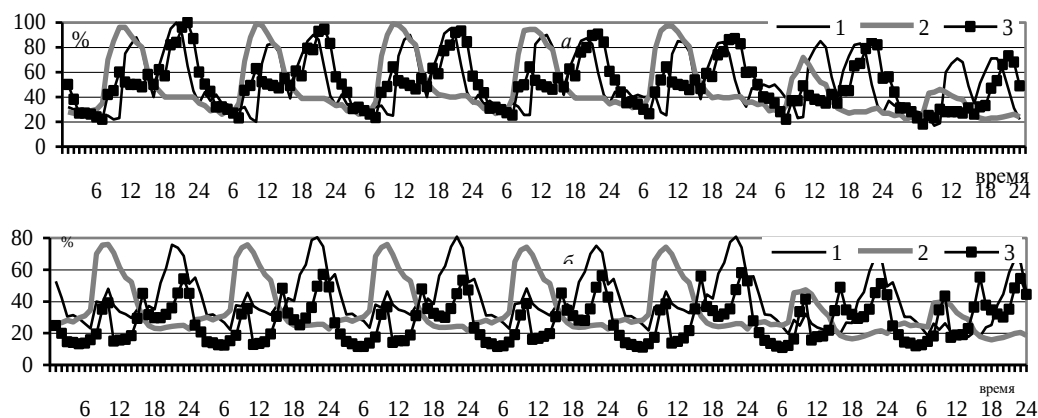


Рис. 2. Профили графиков: *а* — максимальной, *б* — минимальной недельных нагрузок:
1 — индустриальной; 2 — коммерческой; 3 — коммунальной

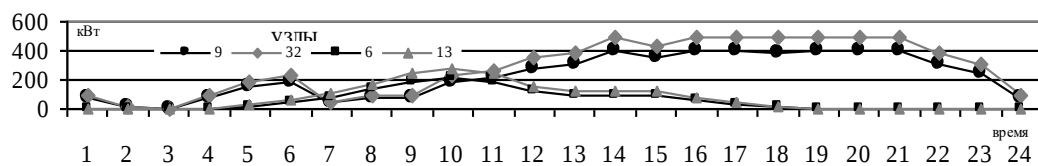
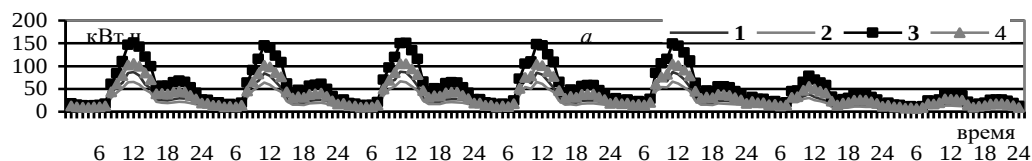


Рис. 3. Изменение активной мощности источников возобновляемой генерации
в узлах распределительной сети в течение суток

На рис. 4 показаны графики потерь в распределительной сети при наличии и отсутствии в ней возобновляемой генерации и реконфигурации в течение недель с режимами максимальной и минимальной нагрузок, подтверждающие существенное влияние возобновляемой генерации на снижение потерь энергии.



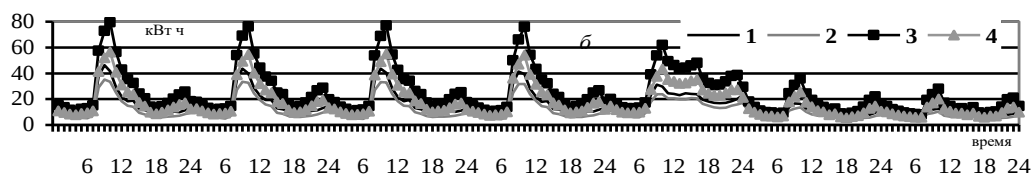


Рис. 4. Изменение потерь энергии в режиме: *а* – максимальной, *б* – минимальной нагрузок в течение недели в первичной распределительной сети:

- с источниками возобновляемой генерации: 1 – при отсутствии, 2 – наличии реконфигурации;
- без источников возобновляемой генерации: 3 – при отсутствии, 4 – наличии реконфигурации

2. Выбор постоянной конфигурации распределительной сети с минимальными потерями

2.1. *Вариант с наличием источников возобновляемой генерации в распределительной сети с максимальными нагрузками.* При оптимальных часовых реконфигурациях в течение недели в исследуемой сети с возобновляемой генерацией число переключений равно 530, что составляет в среднем 76 переключений в сутки. Для сравнения число переключений в сети без генерации за этот же срок равно 132. Исследуем возможность выбора такой постоянной конфигурации распределительной сети, которая позволит обеспечить в течение недели потери, близкие к потерям при оптимальной часовой реконфигурации.

Для определения постоянной конфигурации для каждого дня недели с максимальными нагрузками были проведены следующие расчеты. По заданным часовым значениям нагрузок и генераций определялась конфигурация, обеспечивающая минимум потерь энергии, как это показано на рис. 4. Затем для оптимальных конфигураций каждого часа, при условии их неизменности в течение суток, проводился расчет суточных потерь энергии.

На рис. 5 для семи дней недели, начиная с понедельника, показаны значения суточных потерь при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с каждой из полученных для нее часовых конфигураций.

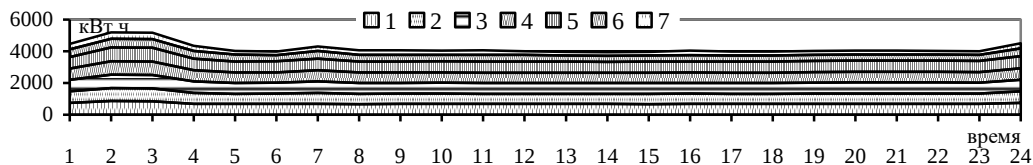


Рис. 5. Значения суточных потерь для каждого дня недели при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с найденной для нее оптимальной часовой конфигурацией

Так, например, для первого дня недели минимальные потери соответствуют 15-му часу, а конфигурация сети определяется линейными выключателями (1: 5-6, 9-10, 13-14, 17-32, 24-28). Конфигурация с минимальными потерями второго дня с линейными выключателями (2: 6-7, 7-8, 13-14, 17-32, 27-28) совпадает с конфигурациями четвертого, шестого и седьмого дней. Конфигурация с минимальными потерями третьего дня определяется линейными выключателями (3: 6-7, 9-10, 13-14, 24-28, 29-30), а конфигурация пятого дня – линейными выключателями (4: 5-6, 10-11, 13-14, 17-32, 24-28).

На рис. 6 для каждой из четырех выделенных конфигураций показано изменение потерь энергии в течение недели, а на рис. 7 приведены суммарные значения недельных потерь, которые сравниваются с потерями при отсутствии реконфигурации и потерями при оптимальной суточной реконфигурации.

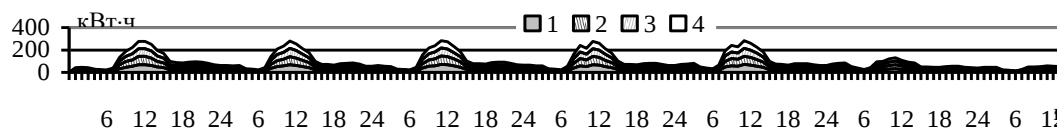


Рис. 6. Изменение потерь энергии в течение недели для каждой из четырех выделенных конфигураций

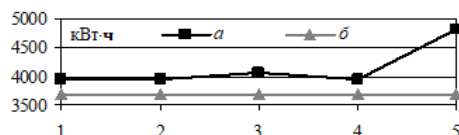


Рис. 7. Сравнение суммарных недельных потерь энергии в распределительной сети:
а – для четырех вариантов с постоянной конфигурацией 1–4 и при отсутствии реконфигурации – 5;
б – при оптимальной часовой реконфигурации

Сравнение потерь (рис. 7) позволяет выделить конфигурацию первого дня недели, при постоянстве которой потери в течение недели на 257 кВт·ч превышают потери оптимальной часовой реконфигурации, требующей 530 переключений.

2.2. *Вариант с отсутствием источников возобновляемой генерации в распределительной сети с максимальными нагрузками.* Для варианта распределительной сети без возобновляемой генерации на рис. 8 показаны значения суточных потерь при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с каждой из полученных для нее оптимальных часовых конфигураций, что позволило выявить конфигурации с минимальными суточными потерями. Установлено, что будним дням соответствует конфигурация с линейными выключателями (1: 6-7, 8-9, 13-14, 24-28, 31-32), а выходным – конфигурация (2: 6-7, 8-9, 13-14, 27-28, 31-32), отличающаяся от конфигурации будних дней на один выключатель. На рис. 9 показаны изменения потерь энергии в течение недели при постоянной конфигурации, соответствующей конфигурациям будних и выходных дней.

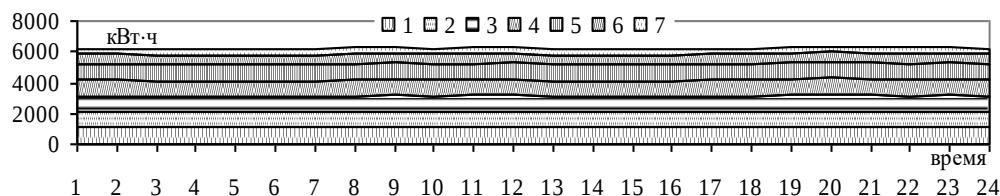


Рис. 8. Значения суточных потерь для каждого дня недели при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с найденной для нее оптимальной часовой конфигурацией

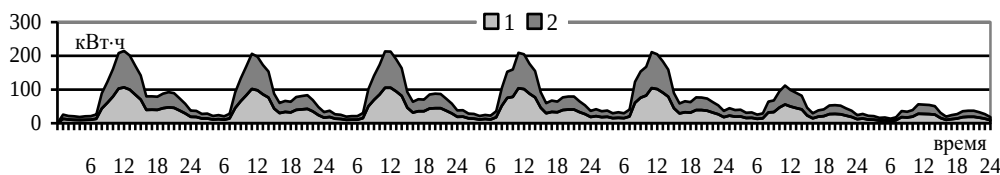


Рис. 9. Изменение потерь энергии в течение недели для двух конфигураций



Рис. 10. Сравнение суммарных недельных потерь энергии в распределительной сети:
а – для двух вариантов с постоянной конфигурацией 1-2 и при отсутствии реконфигурации – 3;
б – при оптимальной часовой реконфигурации

Сравнение потерь при постоянных конфигурациях с потерями при оптимальной недельной конфигурации (рис. 10) показало, что потери при первой конфигурации превышают оптимальные на 64 кВт·ч, а при второй – на 82 кВт·ч, в то время как потери в сети без реконфигурации больше потерь при оптимальной реконфигурации на 2646 кВт·ч.

2.3. *Вариант наличия источников возобновляемой генерации в распределительной сети с минимальными нагрузками.* Для режима минимальной нагрузки при оптимальной часовой реконфигурации сети в течение недели получено снижение потерь, по сравнению с потерями при отсутствии реконфигурации, на 612 кВт·ч при 572 переключениях.

Для оценки возможности выбора постоянной конфигурации на основе графиков, показанных на рис. 11, были выделены три конфигурации с минимальными суточными потерями. Первая конфигурация является общей для первого, второго, шестого и седьмого дней и определяется линейными выключателями (1: 6-7, 7-20, 8-14, 17-32, 27-28). Вторая конфигурация с выключателями (2: 6-7, 7-8, 12-13, 17-32, 27-28) соответствует третьему и четвертому дням. Третья конфигурация соответствует пятому дню и определяется выключателями (3: 5-6, 7-8, 13-14, 17-32, 27-28).

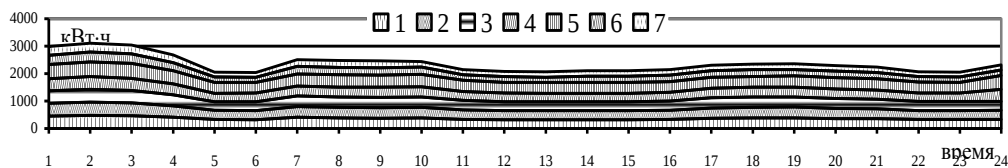


Рис. 11. Значения суточных потерь для каждого дня недели при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с найденной для нее оптимальной часовой конфигурацией

Сравнение суммарных недельных потерь энергии трех вариантов с постоянной конфигурацией позволило выделить вторую конфигурацию, для которой потери отличаются от потерь с оптимальной реконфигурацией на 170 кВт·ч (рис. 12 и рис. 13).

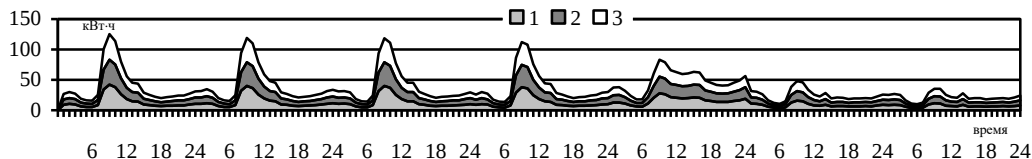


Рис. 12. Изменение потерь энергии в течение недели для трех конфигураций

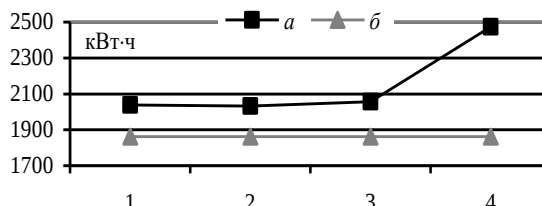


Рис. 13. Сравнение суммарных недельных потерь энергии в распределительной сети:
а – для трех вариантов с постоянной конфигурацией 1-3 и при отсутствии реконфигурации – 4;
б – при оптимальной часовой реконфигурации

2.4. *Вариант без источников возобновляемой генерации в распределительной сети с минимальными нагрузками.* Для режима минимальной нагрузки без возобновляемой генерации были проведены расчеты, результаты которых показаны на рис. 14 – 16.

Анализ показал, что первая из двух выделенных конфигураций, соответствующая будним дням, включает линейные выключатели (6-7, 8-9, 13-14, 24-28, 31-32), а вторая конфигурация для выходных дней отличается от нее только одним линейным выключателем 27-28, который должен заменить линейный выключатель 24-28. Таким образом, конфигурации с минимальными недельными потерями энергии для режимов максимальных и минимальных нагрузок совпадают.

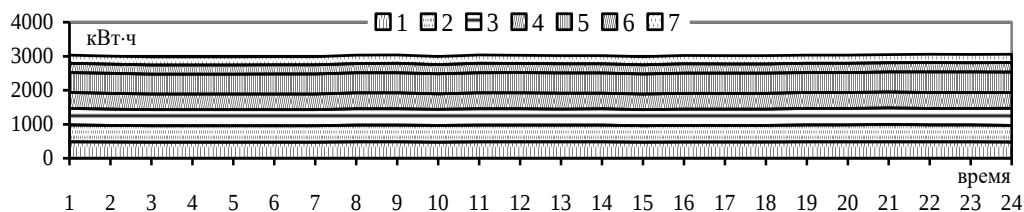


Рис. 14. Значения суточных потерь для каждого дня недели при постоянной конфигурации распределительной сети, совпадающей с найденной для нее оптимальной часовой конфигурацией

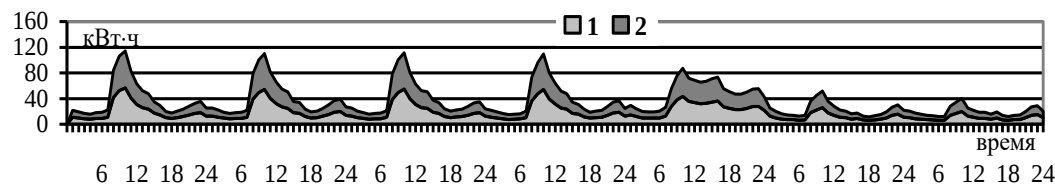


Рис. 15. Изменение потерь энергии в течение недели для двух конфигураций

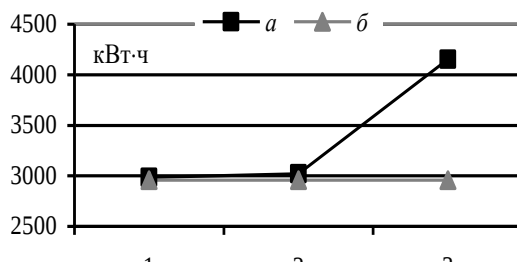


Рис. 16. Сравнение суммарных недельных потерь энергии в распределительной сети:
а – для двух вариантов с постоянной конфигурацией 1-2 и при отсутствии реконфигурации – 3;
б – при оптимальной часовой реконфигурации

Сравнение суммарных недельных потерь показывает, что потери при первой конфигурации отличаются от потерь с оптимальной реконфигурацией на 27 кВт·ч, а при второй конфигурации – на 63 кВт·ч, в то время как потери без реконфигурации превышают потери с реконфигурацией на 1197 кВт·ч.

2.5. *Выбор постоянной конфигурации распределительной сети с минимальными потерями.* Результаты выбора постоянной конфигурации распределительной сети с источниками возобновляемой генерации для режима максимальной и минимальной нагрузок приведены в табл. 1, в которую включены также результаты дополнительного исследования недельных потерь в режиме максимальных нагрузок для трех конфигураций режима минимальных нагрузок и в режиме минимальных нагрузок для четырех конфигураций режима минимальных нагрузок.

Таблица 1

Потери энергии в течение недели с максимальными и недели с минимальными нагрузками,
суммарные потерь энергии за двухнедельный период

№	Составы линейных выключателей	Потери энергии, кВт·ч	Потери энергии, кВт·ч	Суммарные потери энергии, кВт·ч
	Для режима макс. нагрузки	макс. нагрузка	мин. нагрузка	
1	1: 5-6, 9-10, 13-14, 17-32, 24-28	3935,454	2120,017	6055,471
2	2: 6-7, 7-8, 13-14, 17-32, 27-28	3948,498	2028,642	5977,140
3	3: 6-7, 9-10, 13-14, 24-28, 29-30	4056,291	2685,134	6741,425
4	4: 5-6, 10-11, 13-14, 17-32, 24-28	3946,542	2122,655	6069,197

Продолжение табл. 1

	Для режима мин. нагрузки	макс. нагрузка	мин. нагрузка	
5	1: 6-7, 7-20, 8-14, 17-32, 27-28	4077,551	2038,154	6115,705
6	2: 6-7, 7-8, 12-13, 17-32, 27-28	3973,783	2032,745	6006,528
7	3: 5-6, 7-8, 13-14, 17-32, 27-28	3917,894	2056,139	5974,033

Сравнение потерь в течение двух недель с максимальной и минимальной нагрузками показывает, что минимальные потери соответствуют третьей конфигурации режима минимальных нагрузок. Минимальные недельные потери энергии для режимов максимальных и минимальных нагрузок, равные, соответственно, 6182,563 и 2120,201 кВт·ч, в сети без источников возобновляемой генерации достигаются при одной и той же постоянной конфигурации с линейными выключателями 6-7, 8-9, 13-14, 24-28, 31-32.

3. Выбор линейных выключателей для восстановления режима при аварийном отключении секционных выключателей

Для окончательного выбора постоянной конфигурации распределительной сети необходимо убедиться в том, что при аварийных отключениях любого из секционных выключателей замыкание соответствующего ему линейного выключателя не приведет ни к возникновению в распределительной сети недопустимых отклонений напряжений, ни к превышению допустимых по нагреву токов. В случае же нарушения ограничений должны быть выбраны управления, позволяющие обеспечить допустимый послеаварийный режим.

Используемый в работе алгоритм реконфигурации, в основе которого лежит построение на графе сети покрывающего дерева и определение по хордам дерева состава ветвей независимых контуров, идеально подходит для определения линейных выключателей, используемых для восстановления электроснабжения при аварийном отключении секционного выключателя.

Алгоритм выбора вариантов линейных выключателей включает следующие пункты.

1. Ветви с заданными линейными выключателями определяют состав хорд графа сети, а остальные ветви являются ветвями покрывающего дерева.

2. Для определения ветвей каждого независимого контура по его хорде необходимо построить подматрицу N_D блока деревьев второй матрицы инцидентий [10]:

$$N_D = -M_X^T \left(M_D^T \right)^{-1}, \quad (1)$$

содержащую число строк, равное числу хорд, и число столбцов, равное числу ветвей покрывающего дерева, где M_D и M_X – подматрицы первой матрицы инцидентий $M = (M_D M_X)$, соответствующие ветвям дерева и хордам. Формула (1) положена в основу топологического алгоритма [11] построения, как подматрицы $\left(M_D^T \right)^{-1}$, так и второй матрицы инцидентий $N = (N_D N_X)$.

Одна и та же ветвь покрывающего дерева может входить в несколько контуров. В этом случае после аварийного отключения секционного выключателя восстановление режима может быть обеспечено включением любого из связанных с ним общим контуром линейных выключателей. Критерием выбора лучшего варианта могут быть минимальные часовые потери энергии, минимальные отклонения напряжения.

Проанализируем процесс реконфигурации сети с источниками возобновляемой генерации, имеющей конфигурацию, соответствующую 1-му составу линейных выключателей для режима максимальных нагрузок (рис. 17) при аварийных отключениях любого из секционных выключателей. Исследуемая конфигурация соответствует оптимальной конфигурации 15-го часа первого дня недели с максимальными нагрузками.

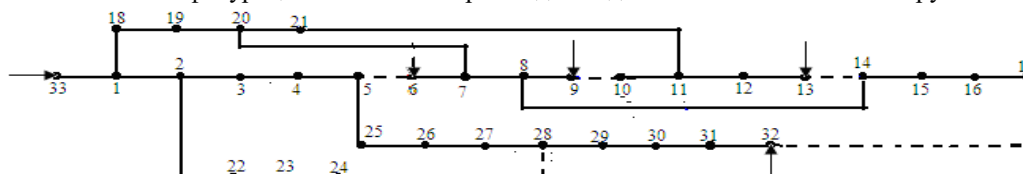


Рис. 17. Конфигурация распределительной сети, соответствующей 1-му составу линейных выключателей для режима максимальных нагрузок

Варианты возможных переключений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Варианты линейных выключателей, которые могут использоваться для восстановления режима при аварийных отключениях секционных выключателей в распределительной сети с источниками возобновляемой генерации

Секционные выключатели	Варианты линейных выключателей				Секционные выключатели	Варианты линейных выключателей	
	1	2	3	4		1	2
1-2	5-6	17-32			14-15	17-32	
1-18	5-6	17-32			15-16	17-32	
2-3	5-6	17-32	24-28		16-17	17-32	
2-22	24-28				18-19	5-6	17-32
3-4	5-6	17-32	24-28		19-20	5-6	17-32
4-5	5-6	17-32	24-28		20-21	9-10	13-14
5-25	17-32	24-28			22-23	24-28	
6-7	5-6				23-24	24-28	
7-8	9-10	13-14	17-32		25-26	17-32	24-28
7-20	5-6	9-10	13-14	17-32	26-27	17-32	24-28
8-9	9-10				27-28	17-32	24-28
8-14	13-14	17-32			28-29	17-32	
10-11	9-10				29-30	17-32	
11-12	13-14				30-31	17-32	
11-21	9-10	13-14			31-32	17-32	
12-13	13-14						

Так, например, при аварийном отключении секционного выключателя 7-20, входящего в четыре независимых контура: 1: 5-6, 5-4, 4-3, 3-2, 2-1, 1-18, 18-19, 19-20, 20-7, 7-6; 2: 9-10: 9-8, 8-7, 7-20, 20-21, 21-11, 11-10; 3: 13-14, 13-12, 12-11, 11-21, 21-20, 20-7, 7-8, 8-14; 4: 17-32, 32-31, 31-30, 30-29, 29-28, 28-27, 27-26, 25-5, 5-4, 4-3, 3-2, 2-1, 1-18, 18-19, 19-20, 20-7, 7-8, 8-14, 14-15, 15-16, 16-17; восстановление питания может быть обеспечено замыканием линейного выключателя, соответствующего хорде (выделена жирным шрифтом) любого из четырех независимых контуров. Если рассматривать линейные

выключатели в качестве претендентов на замену их на удаленно управляемые, то из табл. 2 следует, что вместо пяти удаленно управляемых выключателей для восстановления электроснабжения достаточно четырех удаленно управляемых выключателей. Действительно, в тех аварийных ситуациях, в которых выключатель 24-28 предлагается в качестве альтернативы на восстановление электроснабжения, вместо него может использоваться линейный выключатель 17-32.

Анализ токов и напряжений 15-го часа первого дня недели с максимальными нагрузками установил, что аварийное отключение секционного выключателя 1-2 является единственным случаем, в котором после восстановления режима замыканием линейного выключателя 5-6 произошли нарушения допустимых отклонений напряжений. Ситуаций, связанных с нарушением допустимых по нагреву токов, выявлено не было. В качестве возможного управления для введения напряжений в допустимые пределы выбрано повышение на 6% напряжения в 33 узле питания, которое во всех расчетах задавалось равным номинальному.

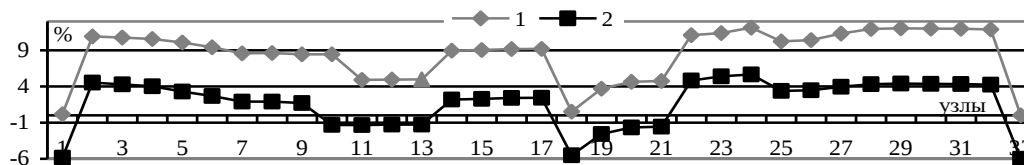


Рис. 18. Отклонения напряжений в узлах распределительной сети (рис. 17):

1 – после отключения связи 1-2 и замыкания связи 5-6 при номинальном напряжении в узле питания;
2 – повышении напряжения в узле питания на 6%

Очевидно, что еще одним важным фактором, требующим дополнительного анализа для гарантированной надежной работы релейной защиты после реконфигурации сети, вызванной аварийным отключением секционного выключателя, является проверка допустимости значений токов коротких замыканий, но такое исследование в данной работе не проводилось.

Заключение

Предложенный подход к выбору постоянной конфигурации распределительной сети для снижения в ней потерь энергии и восстановлению электроснабжения при возникновении аварийных ситуаций является одним из возможных вариантов решения, который может быть реализован на начальном этапе перехода от традиционной пассивной к активной распределительной сети. Важнейшей оценкой эффективности реконфигурации должно быть сравнение таких экономических показателей, как затраты на потери энергии, затраты на переключения, снижение прибыли потребителей из-за перерыва электроснабжения, а также оценка уровня надежности сети до и после реконфигурации. Алгоритмы оптимальной реконфигурации и определения переключений для восстановления энергоснабжения при авариях имеют малую трудоемкость и могут быть введены в программные комплексы расчета потокораспределения в распределительной сети.

Литература

1. Merlin A., Back H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system // Proc. 5th Power System Computation Conf. Cambridge. 1975. P.1–18.
2. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources / M.R. Dorostkar-Ghamsari [et al.] // IEEE Trans. on Power Systems. 2016. Vol. 31, No. 3. P. 1879–1888.
3. Lei S., Wang J., Hou Y. Remote-Controlled Switch Allocation Enabling Prompt Restoration of Distribution Systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, Issue 3. P. 3129–3142.

4. On the transient behavior of large-scale distribution networks during automatic feeder reconfiguration / V. Spitsa [at al.] // IEEE Trans. Smart Grid. 2012. Vol. 3. No. 2. P. 887–896.
5. Yin S.A., Lu C.N. Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs // IEEE Trans. Power Syst. 2009. Vol. 24. No. 2. P. 652–660.
6. Switchgear Solutions, Schneider Electric Inc. <http://static.schneider-electric.us/docs/Electrical%20Distribution/Overhead%20Automation/6000BR1301.pdf>.
7. Identification of Critical Switches for Integrating Renewable Distributed Generation by Dynamic Network Reconfiguration / S. Lei [at al.] // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018. Vol. 9. Issue 3. P. 420–432.
8. Алгоритм оптимизации реконфигурации и суточных графиков нагрузки распределительной электрической сети / И.И. Голуб [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 2018. №1. С.25–34.
9. Особенности оценки потерь энергии в распределительных сетях / И.И. Голуб [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 67. Сыктывкар. 2016. С.141–149.
10. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 333с.
11. Гурский С.К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике. Минск: Наука и техника, 1977. 367с.
12. Войтов О.Н. Анализ и оптимизация установившихся режимов систем энергетики // Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. 68 с.
13. Baran M.E., Wu F.F. Network reconfiguration on distribution systems for loss reduction and load balancing // IEEE Trans. Power Del. 1989. Vol.4. No.2. P.1401–1407.

Авторы публикации

Голуб Ирина Ивановна – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Войтов Олег Николаевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Болоев Евгений Викторович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Семенова Людмила Васильевна – инженер ИСЭМ СО РАН.

References

1. Merlin A., Back H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system // Proc. 5th Power System Computation Conf. Cambridge. 1975. P.1–18.
2. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources / M.R. Dorostkar-Ghamsari [at al.] // IEEE Trans. on Power Systems. 2016. Vol. 31. No. 3. P.1879–1888.
3. Lei S., Wang J., Hou Y. Remote-Controlled Switch Allocation Enabling Prompt Restoration of Distribution Systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Issue 3. P.3129–3142.
4. On the transient behavior of large-scale distribution networks during automatic feeder reconfiguration / V. Spitsa [at al.] // IEEE Trans. Smart Grid. 2012. Vol. 3. No. 2. P.887–896.
5. Yin S. A., Lu C. N. Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs // IEEE Trans. Power Syst. 2009. Vol. 24. No. 2. P.652–660.
6. Switchgear Solutions, Schneider Electric Inc. <http://static.schneider-electric.us/docs/Electrical%20Distribution/Overhead%20Automation/6000BR1301.pdf>.
7. Identification of Critical Switches for Integrating Renewable Distributed Generation by Dynamic Network Reconfiguration / S. Lei [at al.] // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018. Vol. 9. Issue 3. P. 420–432.

8. An optimization algorithm of reconfiguration and daily load curves of the distribution electric network / I.I. Golub [et al.] // Izv. RAS Energetika. 2018. №1. P.25–34.
9. Features of energy losses estimation in distribution networks / I. I. Golub [et al.] // On Methodical problems of reliability research of large energy systems. Issue 67. Syktyvkar. 2016. P. 141–149.
10. Mainika E. Optimization algorithms for networks and graphs. New York: Marcel Dekker, Inc, 1978. 499 c.
11. Gursky S.K. Algorithmization of condition control problems for bulk power systems. Minsk: Nauka i tekhnika, 1977. 367 p.
12. Voitov O.N. Analysis and optimization of steady states of energy systems // System studies in energy. Retrospective of scientific schools at SEI-ISEM, Editor in chief N.I. Voropai. Novosibirsk: Nauka, 2010. 68 p.
13. Baran M.E., Wu F.F. Network reconfiguration on distribution systems for loss reduction and load balancing // IEEE Trans. Power Del. 1989. Vol.4. No.2. P.1401–1407.

Authors of the publication

Irina I. Golub – doct. sci. (techn.), professor, leading researcher Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS).

Oleg N. Voitov – cand. sci. (techn.), associate professor, senior researcher ESI SB RAS.

Evgeny V. Boloev – cand. sci. (techn.), senior researcher ESI SB RAS.

Ludmila V. Semenova – engineer ESI SB RAS.

Поступила в редакцию

30 мая 2018 г.



ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЫГОРАНИЕ ЧАСТИЦ МАЗУТА В ТОПКАХ КОТЛОВ

М.А. Таймаров¹, Р.В. Ахметова¹, С.М. Маргулис¹, Л.И. Касимова²

¹Казанский государственный энергетический университет,

²Казанский национальный исследовательский технологический университет

Резюме: Сложности сжигания обводненного мазута, применяемого на ТЭС в качестве резервного топлива для котлов, связаны с его подготовкой путем нагрева для снижения вязкости и выбором способа распыливания с помощью форсунок в зону горения. Влияющее на КПД котла качество подготовки мазута к сжиганию оценивается по величине длины факела, наличию горящих крупных частиц мазута, набросу коксовых и несгоревших частиц на экраны и другие тепловоспринимающие поверхности. Одним из способов подготовки мазута к сжиганию является кавитационная обработка, в результате которой получается эмульсия, состоящая из мелкодисперсных частиц микронного размера. Нагрев частиц мазута после форсунки при попадании в зону горения происходит за счет потока излучения от горящего факела. Поэтому в настоящей работе экспериментально определены значения плотности потока от факела при сжигании мазута. Рассмотрено влияние размера частиц на скорость горения мазута М100 при различной плотности теплового излучения факела. Получено, что эффект кавитационной обработки мазута на скорость горения наиболее существенно проявляется при размерах частиц менее 10 мкм. Для этой цели при больших расходах мазута преимущественным является применение гидродинамических кавитаторов.

Ключевые слова: кавитационная обработка, мазут, горение, частицы, тепловой радиационный поток, факел, топка, котел, скорость горения, эмульсия.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59

Для цитирования: М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, С.М. Маргулис, Касимова Л.И. Влияние кавитационной обработки на выгорание частиц мазута в топках котлов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 52-59. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59.

THE EFFECT OF CAVITATION TREATMENT ON THE EXTINGUISHING OF PARTICLES OF OILS IN FUEL BOILERS

M.A.Taymarov¹, R.V. Akhmetova¹, S.M. Margulis¹, L.I. Kasimova²

¹Kazan state power engineering university

²Kazan national research technological university

Abstract: The difficulties of burning the watered fuel oil used at the TPP as a reserve fuel for boilers are associated with its preparation by heating to reduce viscosity and the choice of a method of spraying with nozzles into the combustion zone. The quality of the preparation of fuel oil for combustion affecting the boiler efficiency is estimated by the length of the flame,

the presence of burning large particles of fuel oil, the injection of coke and unburned particles onto screen and other heat-receiving surfaces. One of the ways to prepare fuel oil for combustion is cavitation treatment, which results in an emulsion consisting of fine micron-sized particles. Heating of fuel oil particles after the nozzle in contact with the combustion zone is due to the flow of radiation from the burning torch. Therefore, in this article, the values of the flux density from the torch during the combustion of fuel oil are experimentally determined. The influence of particle size on the burning rate of the fuel oil M100 with the different density of the thermal radiation of the flame. It is found that the effect of cavitation treatment of fuel oil on the combustion rate is most significantly manifested in particle sizes less than 10 microns. For this purpose, the use of hydrodynamic cavitators are preferred at high fuel oil consumption rate.

Keywords: cavitation treatment, fuel oil, combustion, particles, heat radiation flow, torch, furnace, boiler, burning rate, emulsion.

For citation: M.A. Taymarov, R.V. Akhmetova, S.M. Margulis, L.I. Kasimova The effect of cavitation treatment on the extinguishing of particles of oils in fuel boilers // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 52-59. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59.

Введение

В процессе хранения мазут обводняется и содержание воды в мазуте М100 может достигать до 11 % по массе [1–3]. Сжигание такого мазута с применением форсунок ФУЗ-5000 в котлах ТГМ-84Б без кавитационной обработки сопровождается значительной длиной факела, набросом его на задний экран и горением крупных частиц в хвостовой части факела. Эти нежелательные факторы приводят к снижению КПД котлов и вызывают перерасход топлива на выработку электрической и тепловой энергии на ТЭС [2]. При хранении более 10 лет мазут не соответствует ГОСТ 10585-2013, так как из него испаряются легкие углеводороды, происходит обводнение мазута и загрязнение механическими примесями.

Исследования [4–7] показали, что кавитационная обработка позволяет получить водомазутную эмульсию с малым размером частиц, горение которых в факеле происходит с более высокой скоростью по сравнению со сжиганием по типовой схеме без кавитационной обработки. Однако кавитационная обработка мазута сопровождается значительными энергетическими затратами на работу кавитаторов [10–12]. Среди кавитаторов перспективным является струйный гидродинамический кавитатор, конструкция которого характеризуется более низкими энергетическими затратами на его работу. Кавитационная обработка мазута при снижении энергетических затрат на работу кавитаторов является перспективным направлением в области разработки технологий для эффективного сжигания жидкого топлива в котлах ТЭС.

Описание объектов исследования и методики исследования

На интенсивность выгорания капель мазута значительное влияние оказывает плотность теплового потока от факела. В данной работе по методике [2] экспериментально исследовались значения плотности теплового потока от факела при сжигании мазута М100 в котлах ТГМ-84Б филиала АО «Татэнерго» Набережночелнинской ТЭЦ. Котел ТГМ-84Б – барабанный, производительностью 420 т/ч, с двухсветным экраном. Шесть горелок ГМУ-45 с единичной мощностью по 50 МВт расположены на фронтальной стене в два яруса: первый нижний ярус имеет 4 горелки, второй ярус имеет 2 горелки. Крутка воздуха в горелках – тангенциальная периферийная с углом наклона лопаток 45° и параметром крутки 1,049. Форсунки для сжигания мазута

– паромеханические ФУЗ-5000. Измерения плотности потока от факела проводились при помощи радиометра полного излучения ТЕРА-50 с градуировкой РК-15. Режимные параметры работы котлов определялись по штатным приборам.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 показаны экспериментальные изорады – кривые равных тепловых потоков от факела, построенные по результатам измерений радиометром ТЕРА-50 через лючки в стенах топки котла ТГМ-84Б при сжигании мазута М100 с содержанием воды 5,2 % без кавитационной обработки.

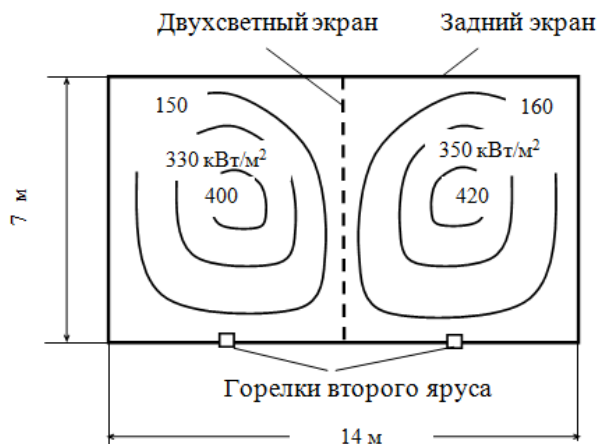


Рис. 1. Изорады тепловых потоков от факела $q_{\text{л}}$ по поперечному сечению топки на отметке 11,2 м котла ТГМ-84Б филиала АО «Татэнерго» Набережночелнинской ТЭЦ при сжигании в паромеханических форсунках ФУЗ-5000 мазута М100 с влажностью 5,2 % при паровой нагрузке 405 т/ч без кавитационной обработки

Как видно из рис. 1, в правой части, по отношению к двухсветному экрану, значения тепловых потоков $q_{\text{л}}$ несколько выше. В зависимости от величины падающего на каплю мазута теплового потока от факела изменяется время ее выгорания. Приведенные на рис. 1 значения лучистых тепловых потоков относятся к горению крупных частиц мазута.

На рис. 2 показана фотография пламени у заднего экрана, выполненная через боковые лючки правой стены на отметке высоты топки 11,2 м котла ТГМ-84Б при сжигании мазута М100 с влажностью 5,2 % без кавитационной обработки.

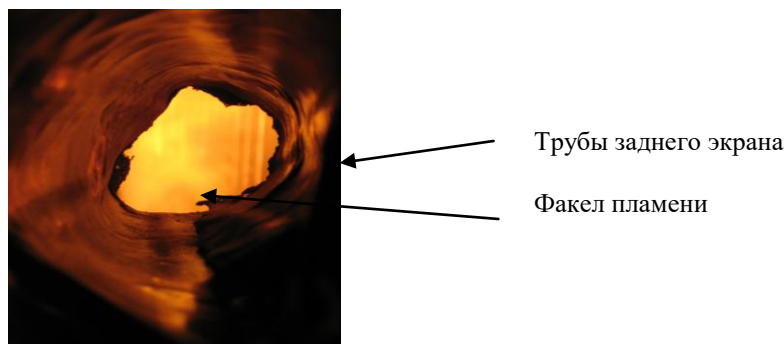


Рис. 2. Вид пламени у заднего экрана топки котла ТГМ-84Б на отметке 11,2м при сжигании мазута М100 без кавитационной обработки

Как видно из рис. 2, при отсутствии кавитационной обработки догорание частиц мазута происходит непосредственно вблизи экранных труб с образованием светящегося факела из горящих сажистых частиц. Значительное количество частиц не сгорает и оседает на экранные трубы в виде темных пятен, что приводит к снижению КПД котлов.

Расчет времени выгорания частиц мазута при изменении их диаметра и падающего теплового потока от факела проводился по методике [8–9]. Количество кислорода, диффундирующее к шаровой поверхности капли мазута, пропорционально квадрату ее диаметра. Горение на некотором удалении от капли мазута происходит с большей скоростью по сравнению с такой же частицей твердого топлива, при горении которого химическая реакция практически протекает на самой поверхности.

Расчет времени выгорания капли проводился по формуле

$$\tau = \frac{\rho[(t_k - t_0)c_{ср} + \lambda_{п}]}{q_{л}} r_0, \quad (1)$$

где τ – время полного выгорания капли, с; ρ – плотность мазута, кг/м³; $c_{ср}$ – средняя теплоемкость мазута, кДж/(кг·К); t_k и t_0 – температура кипения и начальная температура мазута, °С; $\lambda_{п}$ – теплота испарения мазута, кДж/кг; r_0 – начальный радиус капли, м; $q_{л}$ – интенсивность излучения пламени, воспринимаемая каплей мазута на поверхности, кВт/м² [9].

За счет кавитационной обработки могут быть получены частицы мазута М100 с относительно малыми радиусами. При кавитации высоко обводненный мазут в рабочей зоне кавитатора подвергается воздействию, при котором вода мгновенно переходит в паровую фазу, а затем возвращается в жидкое состояние с мелкодисперсным ее распределением по всей массе водомазутной эмульсии.

В малых частицах эмульсии, образующейся после кавитации, при попадании в топку происходит резкое вскипание воды с разрывом внешней углеводородной мазутной оболочки и осуществляется дробление частиц на более мелкие элементы. При этом площадь поверхности мазута с кислородом воздуха многократно возрастает и горение мазута происходит более интенсивно с образованием малого количества промежуточных продуктов.

При отсутствии кавитационной обработки средний диаметр частиц воды составляет около 60 мкм, а после кавитационной обработки – в среднем около 6 мкм.

В табл. 1 приведены результаты расчетов времени выгорания капель мазута М100 τ (сек) с влажностью 5,2 % в зависимости от их радиуса r_0 и величины падающего от факела лучистого потока $q_{л}$ при паровой нагрузке 405 т/ч для котла ТГМ-84Б в сравнении с вариантом без кавитационной обработки.

Таблица 1

Время выгорания капель мазута М100 τ (сек) с влажностью 5,2 % в зависимости от их радиуса r_0 при кавитационной обработке и величины падающего от факела лучистого потока $q_{л}$ для паровой нагрузки 405 т/ч

Радиус частиц r_0 , мкм	Плотность потока излучения $q_{л}$, кВт/м ²					
	150	330	400	160	350	420
30*	0,074	0,034	0,028	0,069	0,032	0,026
12	0,030	0,013	0,011	0,028	0,013	0,010
6	0,015	6,7·10 ⁻³	5,5·10 ⁻³	0,014	6,3·10 ⁻³	5,3·10 ⁻³
3	7,4·10 ⁻³	3,4·10 ⁻³	2,8·10 ⁻³	6,9·10 ⁻³	3,2·10 ⁻³	2,6·10 ⁻³
* – без кавитационной обработки						

Как видно из табл. 1, наблюдается линейная зависимость между уменьшением

размера капле мазута при кавитационной обработке и сокращением времени выгорания

Для центральной зоны факела с уровнем теплового потока 330 кВт/м^2 и выше (см. рис. 1) время выгорания капле обводненного мазута τ без кавитационной обработки можно оценить величиной $0,030 \dots 0,035$ сек, а при использовании кавитационной обработки $3 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ сек.

Однако наличие в топке зон со значением тепловых потоков ниже 150 кВт/м^2 заметно увеличивает время полного выгорания капле мазута при использовании кавитационной обработки, а при ее отсутствии служит причиной наброса несгоревших капле мазута на задний экран в котлах ТГМ-84Б (см. рис. 2).

На рис. 3 показаны данные по распределению тепловых потоков от факела q_d и времени выгорания τ частиц мазута по высоте h для центра топки котла ТГМ-84Б при паровой нагрузке 405 т/ч .

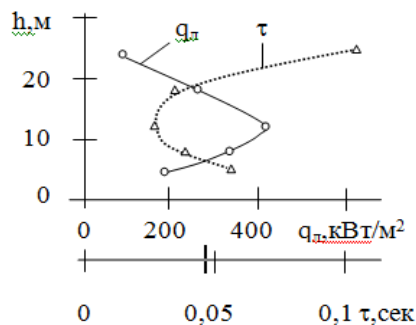


Рис. 3. Распределение тепловых потоков от факела q_d и времени выгорания τ частиц мазута с диаметром капле 60 мкм по высоте h для центра топки котла ТГМ-84Б при паровой нагрузке 405 т/ч без кавитационной обработки

Из рис. 3 видно, что на выходе из топки, соответствующей отметке высоты $h = 25 \text{ м}$, тепловые потоки q_d не превышают 100 кВт/м^2 и для частиц с диаметром капле 60 мкм время выгорания τ составляет $0,11$ сек. При средней скорости движения продуктов сгорания в топке 5 м/сек время пребывания несгоревших частиц мазута на выходе из топке соизмеримо с их скоростью выгорания $\tau = 0,11$ сек при значении излучения факела $q_d = 100 \text{ кВт/м}^2$ при отсутствии кавитационной обработки.

Поэтому сжигание мазута без кавитационной обработки мазута сопровождается отложением сажистых частиц несгоревшего мазута не только на экранных трубах топки, имеющих температуру около 340°C , но и далее по газоходу котлов, особенно на поверхностях нагрева воздухоподогревателя.

Для снижения времени выгорания частиц мазута наиболее эффективным является применение гидродинамических кавитаторов с предлагаемой проточной частью в виде спиральных геликоидных каналов (рис. 4).

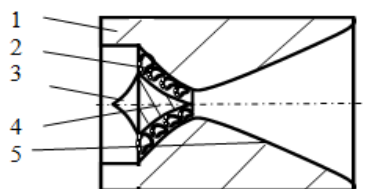


Рис. 4. Спиральный геликоидный кавитатор: 1 — корпус; 2 — спиральные геликоидные каналы; 3 — входной обтекатель; 4 — направляющий гиперболический конус; 5 — выходной диффузор

Подвергаемый кавитационной обработке мазут подается под давлением 6 МПа на входной обтекатель 3, который распределяет мазут по каналам 2.

Сужающиеся спиральные геликоидные каналы 2 закручены по поверхности направляющего гиперболического конуса 4 с увеличивающимся шагом. В каналах 2 происходит ускорение потока мазута, а при выходе в диффузор 5 в результате резкого падения давления происходит явление кавитации, при котором образуется мазутная эмульсия, представляющая собой двухфазную жидкостнопаровую систему: в парах мазута взвешены мельчайшие капельки мазута.

Выводы

Кавитационная обработка мазута позволяет эффективно сжигать в котлах ТГМ-84Б высоко обводненный мазут при диаметрах капель эмульсии менее 12 мкм при плотности тепловых потоков от факела более 150 кВт/м².

Литература

1. Якименко К.Ю., Венгеров А.А., Бранд А.Э. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 5-3. С. 531–536.
2. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., Салтанаева Е.А., Хусаинов Д.Г. Исследование режимных параметров работы котлов при сжигании мазута с повышенным содержанием воды. // *Вестник КГЭУ*. 2017. №2(34). С.68–75.
3. Курочкин А.К. Технология безостаточной переработки содержащего тяжелые фракции газового конденсата. // *Экологический вестник России*. 2016. № 8. С. 12–23.
4. Курочкин А.К., Шишкин В.С. Малые установки для производства дизтоплив из газоконденсатов и малосернистых нефтей. // *Нефть и газ*. 2014. №1. С. 58–65.
5. Стребков Д.С. Исследование дисперсионных жидкостных систем при кавитационной обработке гидротоплив // *Трактора и сельхозмашины*. 2013. №6. С. 24–27.
6. Таймаров М.А., Салтанаева Е.А. Сжигание обводненного мазута в котлах ТЭС // *Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения»* 26–28 апреля 2017. Казань, 2017. Т. 2, с. 52.
7. Gelderen Laurens, Malmquist, Linus M.V., Jomaas Grunde. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. *Fuel*, vol. 191, pp. 528–537. Available: 2017.
8. Катин В.Д., Вольхин И.В., Ахтямов М.Х., Криштоп В.В., Свириг Г.А. Новые установки для приготовления водомазутных эмульсий к малоотходному сжиганию в паровых и водогрейных котлах предприятий железнодорожного транспорта // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 3 (часть 3). С. 495–500.
9. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Safin R.G. Calculation of Fuel Oil Drop Burnup Time Dependence on Intensity of Flame Radiation // *Research Journal of Applied Sciences*, 2016 Volume: 11, P. 1660–1665.
10. Ивченко В.М. Кавитационная технология / Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. / Под ред. Г.В. Логвиновича. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
11. Зубрилов С.П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах / С.П. Зубрилов, В.М. Селиверстов, М.И. Браславский. Л.: Судостроение, 1988. 80 с.
12. Стребков Д.С. Исследование дисперсионных жидкостных систем при кавитационной обработке гидротоплив / Д.С. Стребков, Ю.А. Кожевников, В.В. Сербин, Ю.М. Щекочихин, В.Г. Николаев. // *Трактора и сельхозмашины*. 2013. №6. С. 24–27.
13. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Булгаков А.Б., Морозова Е.А. Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96 // *Теплоэнергетика*. 2006. № 6. С. 31–35.
14. Девисилов В.А. Теория горения и взрыва: учебное пособие для вузов. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.

15. Kadota T.; Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion// Progress in energy and combustion science Том: 28 Выпуск: 5 Стр.: 385–404 Номер статьи: PII S0360-1285(02)00005-9 Опубликовано: 2002.
16. Пат. № 2516638 РФ, МПК В 05 В 1/34. Кавитатор / Таймаров М.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КГЭУ. Опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
17. Арсенкин А.М. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.
18. Кнорре Г.Ф., Палеев И.И. Теория топочных процессов. М.: Энергия, 1966. 476 с.
19. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 296 с.
20. Таймаров М.А. Расчет параметров выгорания капли мазута. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012614536 от 21 мая 2012 г.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Ахметова Римма Валентиновна – старший преподаватель кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ahmetova_rv@bk.ru.

Маргулис Сергей Михайлович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: msergey1952@gmail.com.

Касимова Лейсан Ильгизаровна – аспирант КНИТУ. E-mail: k.lays@yandex.ru.

References

1. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. Application of the technology of high-viscosity oil transportation in order to increase the efficiency of transportation. // Fundamental research. 2016. № 5-3. P. 531–536.
2. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Sungatullin R.G., Sultanaeva E. A., Khusainov, D.G. Investigation of operational parameters of the boilers when burning fuel oil with high water content.// Vestnik KGEU. 2017. № 2(34). P. 68–75.
3. Kurochkin A.K. Technology of residual-free processing of gas condensate containing heavy fractions. // Ecological Bulletin of Russia. 2016. № 8. P. 12–23.
4. Kurochkin A.K., Shishkin V.S. Small installations for the production of diesel fuel from gas condensates and low-sulfur oils. // Oil and Gas. 2014. №1. P. 58–65.
5. Strebkov D.S. the Study of dispersive liquid systems when the cavitation processing hydrotopes // Tractors and agricultural machinery. 2013. № 6. P. 24–27.
6. Taymarov M.A., Sultanaeva E.A. Burning watered fuel oil in the boilers of thermal power plants. // Proceedings of the XII international youth scientific conference "Tinchurin readings" April 26-28, 2017. Kazan, 2017. Vol. 2, P. 52.
7. Gelderen Laurens, Malmquist, Linus M.V., Jomaas Grunde. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. Fuel, vol. 191, p. 528–537. Available: 2017.
8. Katin V.D., Volkhin I.V., Akhtyamov M.X, Kryshchok V.V., Svirin G.A. New installations for preparation of water-oil emulsions for low-waste combustion in steam and hot-water boilers of the enterprises of railway transport. // Fundamental study. 2016. №. 3 (part 3). P. 495–500.
9. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Safin R.G. Calculation of Fuel Oil Drop Burnup Time Dependence on Intensity of Flame Radiation // Research Journal of Applied Sciences. 2016. Volume: 11, P. 1660–1665.

10. Ivchenko V.M. Cavitation technology / Ivchenko, V. M., Kulagin, V. A., Nemchin, A. F., V. Logvinovich, ed. Krasnoyarsk: Publishing house of KSU, 1990. 200 sec.
11. Zubrilov S.P. Ultrasonic cavitation treatment of fuels on ships / S.P. Zubrilov, V.M. Seliverstov, M. I. Braslavsky. L.: Shipbuilding, 1988. 80 sec.
12. Strebkov D.S. Study of the dispersion liquid of the system when the cavitation processing hydrotopes / D.S. Strebkov, Yu.A. Kozhevnikov, V.V. Serbin, Yu.M. Schekochikhin, V.G. Nikolaev // Tractors and agricultural machinery. 2013. №. 6. P. 24–27.
13. Zroychikov N.A., Lyskov M.G., Bulgakov A.B., Morozova E.A. Research and experience in the use of water-oil emulsions on power boilers TGMP-314 and tgmm-96 // Heat power Engineering. № 6. 2006. P. 31–35.
14. Devisilov V.A. Theory of combustion and explosion: a textbook for universities. M.: FORUM, 2012. 352 p.
15. Kadota T.; Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion // Progress in energy and combustion science Volume: 28 Issue: 5 P: 385–404 article Number: PII S0360-1285 (02)00005-9 Published: 2002.
16. The pat.№ 2516638 RU. Cavitator / Taymarov M.A. 20.05.2014.
17. Arinkin A.M. Hydromechanical dispersion. M.: Science, 1998. - 331 p.
18. Knorre F.G., Paleev I.I. Theory of combustion processes. M.:Energy, 1966. 476 p.
19. Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. Thermal performance testing of boiler plants. Moscow: Energy, 1977. 296 p.
20. Taymarov M.A. Calculation of parameters burn a drop of oil. Certificate of state registration of computer programs №2012614536 from may 21, 2012.

Authors of the publication

Mikhail Aleksandrovich Taymarov – Doc. Sci. (Techn.), Professor, Department Energy engineering, Kazan state power engineering university. E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Rimma Valentinovna Akhmetova – senior lecturer, Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university. E-mail: ahmetova_rv@bk.ru.

Sergei Mikhailovich Margulis – PhD sciences (Techn), Head the Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university. E-mail: msergey1952@gmail.com.

Leysan Ilgizarovna Kasimova – PhD student, Kazan national research technological university. E-mail: k.lays@yandex.ru.

Поступила в редакцию

31 августа 2018 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



УДК 621.436

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПЫЛА НАГРЕТОГО ГАЗА И ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ СО СРЕЗАМИ

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.С. Кочев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты экспериментальных исследований распыла нагретого газа и перегретой жидкости через насадки со срезами с целью установления закономерностей влияния конфигурации каналов на характеристики струй. Описываются экспериментальные установки, методика проведения опытов и приборно-измерительная аппаратура. Для визуализации процесса истечения жидкостей и газов использованы фотосъемка и тепловизионная диагностика. Установлено, что при истечении нагретого газа через насадки со срезом отсутствует смещение оси струи относительно оси выходного отверстия. При истечении перегретой воды через насадки со срезом выходного отверстия, имеет место смещение оси струи в направлении нормали к поверхности среза в диапазоне 15–18 градусов относительно оси распыливающего отверстия.

Ключевые слова: распыл жидкостей и газов, щелевые каналы, взрывное вскипание, экспериментальные исследования, характеристики струи.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-60-70

Для цитирования: 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 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 60-70. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-60-70.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FEATURES OF SPRAYING A HEATED GAS AND SUPERHEATED LIQUID THROUGH CYLINDRICAL CHANNELS WITH SLICES

L.V. Plotnikov¹, Y.M. Brodov¹, B.P. Zhilkin¹, N.S. Kochev¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: The article presents the experimental studies results of a superheated liquid and a heated gas spraying through nozzles with cuts in order to determine the influence of the channel configuration on the characteristics of the jets. Experimental setups, experimental methods and instrumentation are described in the article. Photographing and thermal imaging was used to visualize the flow of liquids and gases. It was determined that there is no displacement of the jet axis relatively to the axis of the outlet opening when the heated gas flows through the nozzles with a cut. It is shown that there is a displacement of the axis of the jet relative to the axis of the outlet in the range of 15-18 degrees when the superheated water flows through the nozzles having a cut of the off outlet.

Keywords: spraying of liquids and gases, slit channels, explosive effervescence, experimental studies, jet characteristics.

For citation: L.V. Plotnikov, Y.M. Brodov, B.P. Zhilkin, N.S. Kochev Comparative analysis of the features of spraying a heated gas and superheated liquid through cylindrical channels with slices // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 60-70. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-60-70.

Введение

В большинстве технологических процессов исходной фазой, во многом определяющей эффективность установок и оборудования, является подача жидких и газовых сред к потребителям. В частности, мелкодисперсное распыление жидкостей в замкнутом объеме является одним из приоритетных направлений в развитии энергетики; известен ряд российских и зарубежных исследований в этой области [1–4]. Естественно, что управление этим процессом представляет чрезвычайный интерес для прикладной науки и инженеров-практиков, проектирующих технологическое оборудование. Так, например, в двигателестроении существует перманентная проблема управления структурой (формой) струи топлива, впрыскиваемой в камеру сгорания для достижения эффективного сжигания [5–9].

Цель настоящего исследования состояла в установлении сравнительных закономерностей влияния геометрии выходного отверстия канала на характеристики истекающей через него струи газа (воздуха) и жидкости. Для этого были проведены экспериментальные исследования процесса горизонтального стационарного истечения нагретого воздуха и перегретой жидкости через насадки с каналами круглого сечения и различными углами среза α выходного отверстия (рис. 1). Таким образом, исследования проводились как для среды с фазовым переходом, так и с отсутствием такового.

Для определения степени влияния угла среза на процесс истечения воздуха и жидкости были использованы насадки с выходными отверстиями с углами среза $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° . В опытах срез выходного отверстия был направлен строго вверх относительно горизонтали (см. рис. 1).

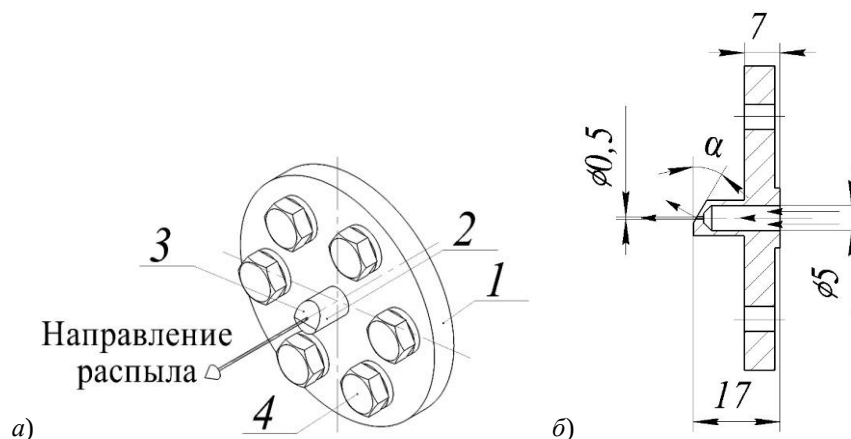


Рис. 1. Общий вид насадка (а) и его геометрические характеристики (б):
1 – фланец; 2 – распыливающий канал с выходным отверстием; 3 – срез выходного отверстия;
4 – крепежные элементы

Исследование распыла нагретого воздуха

Исследования истечения нагретого воздуха проводились на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 2.

Для визуализации процесса истечения была применена тепловизионная фотосъемка сетчатого экрана (поз. 1) с помощью тепловизора (поз. 2). Данный метод, который основан на анализе полей дисперсии температуры, заключается в размещении в потоке тепловизирующей сетки из нитей. Воздух из окружающей среды нагнетался компрессорами поз. 3, 4 и 5 в ресивер (поз. 6) под избыточным давлением до 0,17 бар. Из ресивера воздух проходил через расходомер (поз. 7) и участок нагрева, где был установлен нагреватель (поз. 8). Исходный уровень нагрева воздуха задавался при помощи регулятора напряжения (поз. 9). После участка нагрева был установлен фланец для крепления насадков. Давление перед выходным отверстием измерялось U-образным водяным манометром (поз. 10). Исследования проводились при разных параметрах истечения нагретого воздуха, которые определялись количеством задействованных компрессоров (см. ниже).

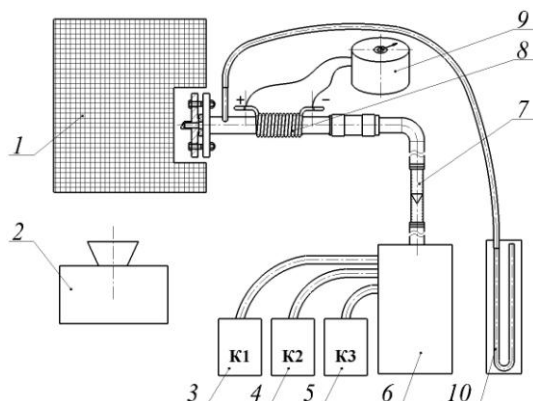


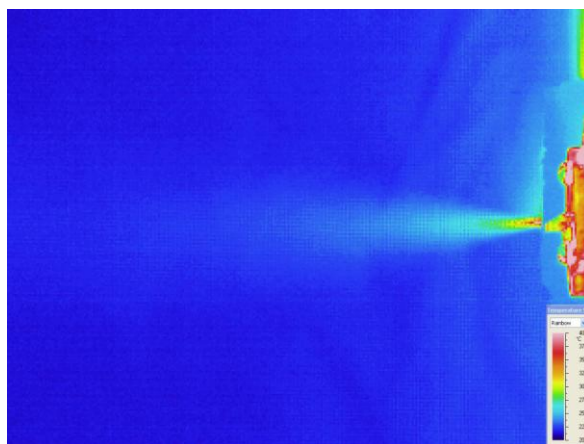
Рис. 2. Схема экспериментальной установки для истечения нагретого воздуха:
1 – сетчатый экран; 2 – тепловизор; 3, 4, 5 – компрессоры; 6 – ресивер; 7 – расходомер;
8 – нагреватель; 9 – регулятор напряжения; 10 – U-образный манометр

Для термографирования процесса истечения нагретого воздуха через насадки использовался матричный тепловизор *NEC Thermo Tracer TH-9100WL*. Погрешность измерения температуры составляла $\pm 2^\circ\text{C}$.

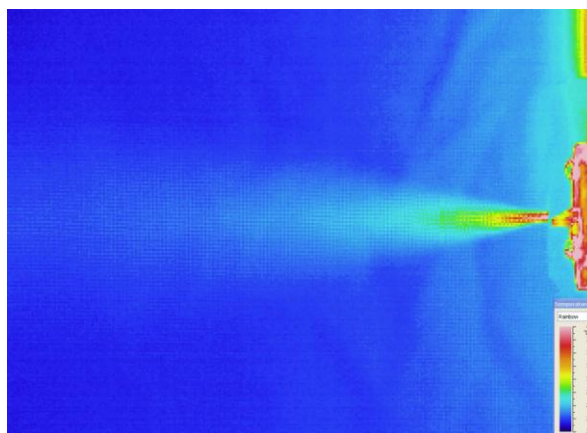
Температурный диапазон чувствительности тепловизора был выбран эмпирически, исходя из наглядности термограмм, и составлял $20\text{--}40^\circ\text{C}$. Обработка термограмм производилась в программном комплексе «*NEC Image Processor*». Подробней используемый метод термографирования структуры газовых потоков описан в работах [10–12].

В ходе проведения опытов давление в магистрали регулировалось в диапазоне от 0,036 до 0,172 бар, а температура – на уровне $30\text{--}40^\circ\text{C}$. В качестве примера отдельные результаты исследований показаны на рис. 3 и 4.

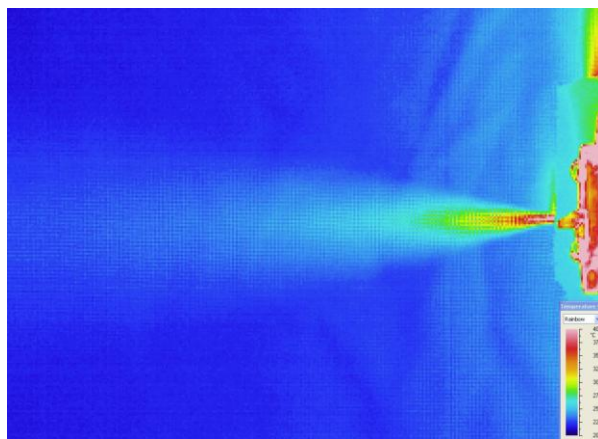
Полученные термограммы истекающего воздушного потока были проанализированы по основным характеристикам струи: длина, углы раскрытия и отклонения от оси отверстия.



а)

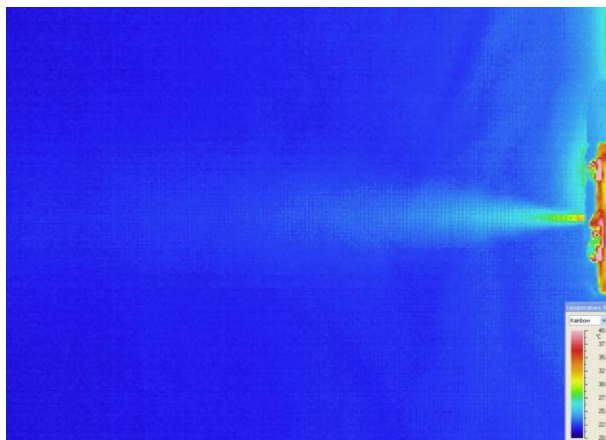


б)

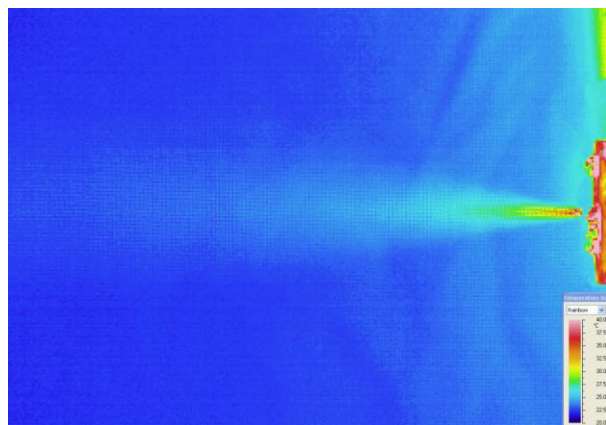


в)

Рис. 3. Термограммы истечения воздуха через насадок с выходным отверстием со срезом $\alpha = 30^\circ$:
а – расход 0,0015 м³/ч; б – расход 0,014 м³/ч; в – расход 0,019 м³/ч



а)



б)

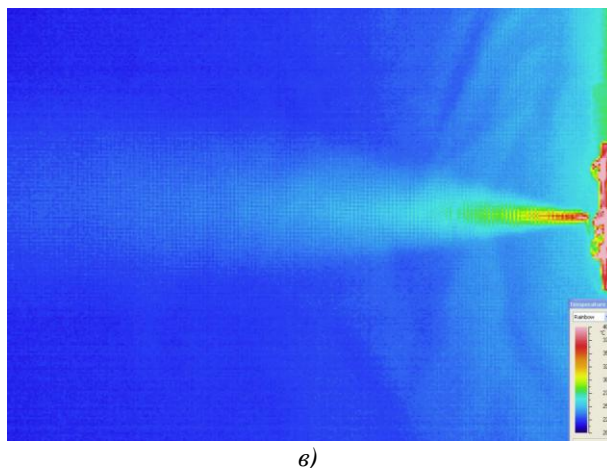


Рис. 4. Термограммы истечения воздуха через насадку с выходным отверстием со срезом $\alpha = 60^\circ$:
 a – расход $0,0013 \text{ м}^3/\text{ч}$; b – расход $0,014 \text{ м}^3/\text{ч}$; $в$ – расход $0,019 \text{ м}^3/\text{ч}$

Установлено, что при распыле нагретого воздуха при всех значениях угла среза выходного отверстия ось струи совпадает с осью отверстия насадка в изменяющихся по расходу и давлению условиях истечения. Наличие среза у насадка фактически не оказывает влияния на смещение оси распространения струи относительно оси отверстия при истечении воздуха через насадки разной конфигурации.

Выявлено, что величина угла среза выходного отверстия насадка оказывает существенное влияние на угол раскрытия струи: наибольшие его значения относятся к насадку с $\alpha = 30^\circ$, наименьшие – к насадку с $\alpha = 60^\circ$. Эти отличия достигали 35 %. Необходимо отметить, что с увеличением расхода воздуха через насадки происходит рост угла раскрытия струи: это характерно для всех геометрических конфигураций насадков (разных α).

Как и следовало ожидать, с ростом расхода воздуха происходит увеличение длины распространения струи через все насадки. Так, для насадка с углом среза выходного отверстия $\alpha = 30^\circ$ длина струи l составляла от 62 до 85 мм при увеличении расхода воздуха от $0,0013$ до $0,019 \text{ м}^3/\text{ч}$, в то время как для насадка с $\alpha = 45^\circ$ величина l находилась в диапазоне от 41 до 67 мм при тех же расходах воздуха. При этом максимальная длина струи на всех режимах зарегистрирована у насадка с $\alpha = 30^\circ$.

Исследование распыла перегретой жидкости

Для уточнения закономерностей влияния угла среза на особенности распыла технологических жидкостей разного агрегатного состояния полученные результаты были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований динамики истечения также в горизонтальном направлении перегретой жидкости, через эти же насадки с выходными отверстиями со срезами под разными углами в воздушную среду, находящуюся при барометрическом давлении. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода согласно ГОСТ 6709-72. Схема экспериментальной установки для истечения перегретой воды через насадки показана на рис. 5.

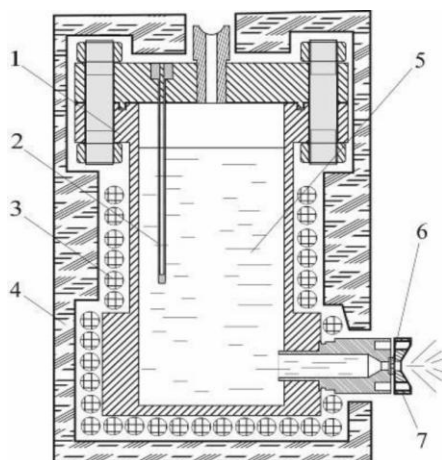


Рис. 5. Схема установки для истечения перегретой воды через насадки:

1 – корпус камеры; 2 – кожух для термопары; 3 – нагревательный элемент; 4 – теплоизолятор;
5 – жидкость; 6 – канал; 7 – прижимной фланец

Корпус рабочей камеры (поз. 1) представлял собой цилиндрический стакан объемом 1 литр, выполненный из нержавеющей стали. Камера была покрыта слоем теплоизоляции (поз. 4) и имела сообщение с окружающей средой посредством канала (поз. 6) и отверстия в прижимном фланце (поз. 7). Регулировка начала и окончания подачи осуществлялась с помощью запирающего клапана (на рисунке не показан). Нагрев жидкости (поз. 5), находящейся внутри камеры, обеспечивался электрическим нагревательным элементом (поз. 3). Опыты проводились в дискретном режиме, по мере израсходования жидкости в рабочей камере. Таким образом лабораторная установка обеспечивала стационарное истечение в течение 10–20 секунд из сосуда высокого давления. Методика проведения данных исследований более подробно описана в работах [13, 14].

В ходе эксперимента температура воды варьировалась от 150 до 300 °С, давление – от 5 до 10 бар. Для визуализации процесса истечения использовалась фотосъемка с применением фотоаппарата *Nikon D70*.

В качестве примера на рис. 6 показаны результаты исследования истечения перегретой воды через насадок со срезом выходного отверстия $\alpha = 45^\circ$.

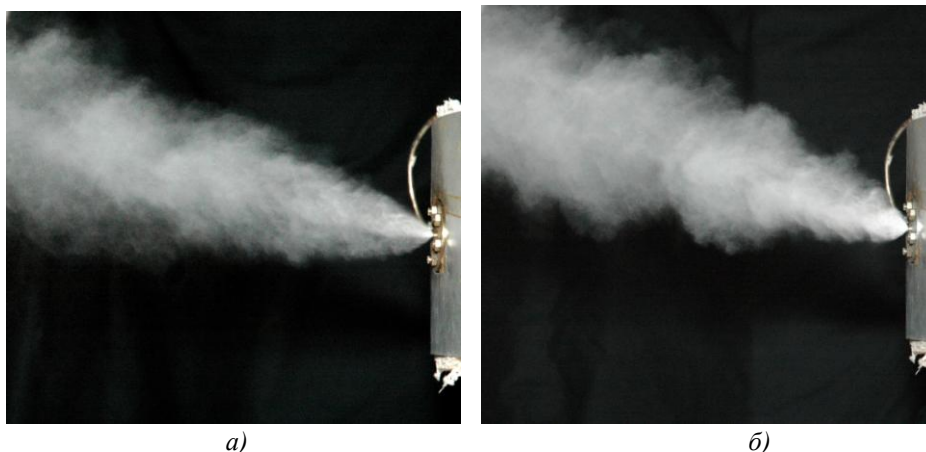


Рис. 6. Фотоснимки истечения воды через насадок со срезом выходного отверстия $\alpha = 45^\circ$:
а – температура воды 150°C, давление 5 бар; б – температура воды 190°C, давление 10 бар

Опытами установлено, что при горизонтальном истечении перегретой воды через насадки со срезом выходного отверстия наблюдается смещение оси струи относительно оси отверстия на величину от 15 до 18 градусов в направлении нормали к поверхности среза, что характерно для всех условий истечения. При этом примечательно, что тенденции изменения угла между осью струи и осью выходного отверстия по мере роста температуры и давления не выявлено.

Визуально обнаружено, что по мере роста значений давления и температуры воды угол раскрытия струи увеличивался от 23 до 30 градусов. Измерение длины струи перегретой воды не производилось.

В современных экспериментальных исследованиях взрывного вскипания струй перегретой жидкости показано [15, 16], что в теплофизических системах при фазовых переходах первого рода происходит скачкообразное изменение свойств распыливаемой жидкости: плотности, энтропии и др. При этом в этих же работах установлено, что поведение интегральных характеристик струи сильно перегретой жидкости (расход, реактивная сила, угол раскрытия) определяется кинетикой рождения пузырьков пара в условиях высоких пересыщений. Более того, в работе [14] выявлено влияние конфигурации распыливающего отверстия на характеристики струи. Таким образом, можно предположить, что в нашем случае причинами отклонения оси струи воды, истекающей при сверхкритических параметрах, относительно оси выходного отверстия насадков являются не только изменение теплофизических свойств распыливаемой среды, а наличие фазового перехода, особенности кинетики рождения пузырьков пара, начиная от кипения на отдельных единичных центрах и до объемного вскипания, а также изменение геометрии выходного отверстия (наличие среза у насадка).

Для сопоставления результатов истечения жидкости и воздуха были произведены исследования истечения перегретой воды с фиксацией истечения с помощью тепловизора. В качестве примера на рис. 7 показана одна из термограмм.



Рис. 7. Термограмма истечения воды через насадок с выходным отверстием со срезом $\alpha = 45^\circ$, температура воды 150°C , давление 5 бар

Тепловизионная съемка показала высокую степень согласованности и соответствия результата с результатами фотосъемки, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Заключение

Таким образом, на основании рассмотренных данных и проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

- установлено, что при истечении нагретого воздуха (без фазового перехода) через насадки, имеющие разный угол среза выходного отверстия, смещение оси струи относительно оси выходного отверстия отсутствует;

- выявлено, что величина угла среза выходного отверстия насадка оказывает существенное влияние на угол раскрытия воздушной струи;
- установлено, что при истечении перегретой воды через насадки, имеющие разный угол среза выходного отверстия, имеет место смещение оси струи относительно оси выходного отверстия в диапазоне от 15 до 18 градусов в направлении нормали к поверхности среза;
- обнаруженные физические эффекты и закономерности могут быть использованы для совершенствования процессов впрыска и смесеобразования в топливных системах поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания для формирования либо направленного объемного, либо комбинированного, либо пристеночного смесеобразования – это позволит улучшить полноту и эффективность сгорания топлива;
- полученные результаты являются основополагающими для проведения дальнейших исследований процессов истечения технических газов и жидкостей через каналы, в том числе с проведением их динамического анализа, с целью практического применения в энергетических машинах и установках, в частности в топливных системах газовых турбин и поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Литература

1. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палесов И.И. Распыливание жидкости форсунками /Под ред. С.С. Кутателадзе. М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. 258 с.
2. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 206 с.
3. Liu H. Science and Engineering of Droplets Fundamentals and Applications. William Andrew Publishing: Noyes, 2000. 508 p.
4. Experimental researches regarding the dispersion angle of the nozzle jet from spraying machines / Roşu M., Căşândroiu T., Matache M.G., Vlăduţ V., Pruteanu A. // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2018. Vol. 80, No 1. P. 207–218.
5. Влияние альтернативного процесса впрыскивания топлива на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, И. А. Зиновьев, А. С. Голосов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 5. С. 152–159.
6. G. P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto. Simulating Combustion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 401 p.
7. Грехов Л.В. Впрыскивание дизельного топлива под давлением до 400 МПа / Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков // Национальная ассоциация ученых, 2015. № 8. С. 24–28.
8. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail / Л.В. Грехов. М.: МГТУ, 2000. 64 с.
9. Effect of the nozzle holder on injected fuel temperature for experimental test rigs and its influence on diesel sprays / J. Gimeno, P. Martí-Aldaraví, M. Carreres, J.E. Peraza // International Journal of Engine Research. 2018. Vol. 19, No 3. P. 374–389.
10. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'nikov A.Yu., Mirenskii V.Yu., Khudyakov P.Yu. Thermal imaging identification of turbulent structures in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2006. Vol. 53, No 1. P. 143–146.
11. Жилкин Б.П., Ларионов И.Д., Шуба А.Н. Устройство для измерения температурного поля газового потока. Патент на изобретение № 2230300 RU от 10.04.2002.
12. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 47, No 4. P. 545–546.
13. Бусов К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды при истечении через короткие каналы / К.А. Бусов // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3, № 7. С.308–313.
14. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании / Н.А. Мажейко, А.В. Решетников, К.А. Бусов, В.П. Коверда, А.А. Старостин, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 35–40.
15. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015.

Vol. 85. P. 965–970.

16. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. Vol. 19, No 2. P. 329–336.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, зав. «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: tot@ustu.ru.

Кочев Николай Сергеевич – аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: kochev91@list.ru.

References

1. Vitman L.A., Kacnel'son B.D., Paleev I.I. Spraying liquid nozzles. Ed. S.S. Kutateladze. Moscow: State Energy Publishing House, 1962. 258 p.
2. Ditjakin Ju.F., Kljachko L.A. Spraying of liquids. Moscow: Mechanical Engineering, 1977. 206 p.
3. Liu H. Science and Engineering of Droplets Fundamentals and Applications. William Andrew Publishing: Noyes, 2000. 508 p.
4. Experimental researches regarding the dispersion angle of the nozzle jet from spraying machines / Roşu M., Căşandroi T., Matache M.G., Vlăduţ V., Pruteanu A. // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2018. Vol. 80, No 1. P. 207–218.
5. Influence of the alternative process of fuel injection on local formations of nitrogen oxides and soot in the combustion chamber of a diesel engine / R.Z. Kavtaradze, D.O. Onishhenko, I.A. Zinov'ev, A.S. Golosov // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2016. No 5. P. 152–159.
6. G.P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto. Simulating Combustion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 401 p.
7. Grehov L.V. Injection of diesel fuel under pressure up to 400 MPa / L.V. Grehov, A.A. Denisov, E.E. Starkov // National Association of Scientists, 2015. No 8. P. 24–28.
8. Grehov L.V. Accumulator fuel systems of internal combustion engines of the Common Rail type / L.V. Grehov. Moscow: MSTU, 2000. 64 p.
9. Effect of the nozzle holder on injected fuel temperature for experimental test rigs and its influence on diesel sprays / J. Gimeno, P. Martí-Aldaraví, M. Carreres, J.E. Peraza // International Journal of Engine Research. 2018. Vol. 19, No 3. P. 374–389.
10. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'nikov A.Yu., Mirenskii V.Yu., Khudyakov P.Yu. Thermal imaging identification of turbulent structures in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2006. Vol. 53, No 1. P. 143–146.
11. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Device for measuring the temperature field of a gas stream. Patent for invention № 2230300 RU of 10.04.2002.
12. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 47, No 4. P. 545–546.

13. Busov K.A. Dynamic characteristics of jets of superheated water when flowing through short channels / K.A. Busov // Thermal processes in engineering. 2011. Vol. 3. No 7. P.308–313.

14. The influence of thermal and geometric factors on the spraying of liquids during explosive boiling / N.A. Mazhejko, A.V. Reshetnikov, K.A. Busov, V.P. Koverda, A.A. Starostin, L.V. Plotnikov, B.P. Zhilkin, Yu.M. Brodov // Heavy machine building. 2014. No 6. P. 35–40.

15. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 85. P. 965–970.

16. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. Vol. 19, No 2. P. 329–336.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – PhD (tech) Sci, associate Professor, Department of turbines and engines, «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (UrFU).

Boris P. Zhilkin – Doc. Sci (physical&mathematical), Professor, Department «Heat power and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Yurii M. Brodov – Doc. Sci (tech), head Department of turbines and engines, «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (UrFU).

Nikolaj S. Kочев – postgraduate student, Department «Heat power and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Поступила в редакцию

22 мая 2018 г.



ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ГИДРОТУРБИН

Е.В. Георгиевская

ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9894-8868>, GeorgievskayaEV@ckti.ru,

e_georgievskaya@mail.ru

Резюме: Для планирования своевременной реконструкции, модернизации, ремонтов или замены оборудования важно достоверно прогнозировать момент его перехода в предельное состояние, определяющее ресурс. В настоящее время не существует нормативных методов оценки ресурса гидротурбин на стадии эксплуатации. Представленный в докладе подход использует методы механики разрушений для построения долгосрочного индивидуального прогноза развития опасных дефектов в основных элементах гидротурбин с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных особенностей. Прогноз строится на базе трехмерных математических моделей, описывающих изменение технического состояния оборудования во времени в условиях фактической эксплуатации. Для расчетов используется программный комплекс Ansys. Модели учитывают размер и положение обнаруженных или возможных дефектов. Рост трещин определяется совокупностью низко- и высокочастотных нагрузок. Критическая длина трещины соответствует моменту изменения механизма развития трещин, когда резко возрастает риск разрушения. Использование предложенного подхода позволяет существенно снизить риск внепланового или аварийного останова гидроагрегата в межремонтный период вследствие его разрушения.

Ключевые слова: механика разрушения, гидротурбина, отказ, трещина, оценка ресурса.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78

Для цитирования: Георгиевская Е.В. Применение механики разрушений для прогнозирования ресурса радиально-осевых гидротурбин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 71-78. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78.

APPLICATION OF BREAKDOWN MECHANICS FOR PREDICTING THE RESOURCE OF AXIAL RADIAL HYDROTURBINS

E.V. Georgievskaya

JSC «NPO CKTI», St. Petersburg, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9894-8868>, e_georgievskaya@mail.ru,

GeorgievskayaEV@ckti.ru

Abstract: To plan for timely reconstruction, modernization, repairs or replacement of equipment it is important to reliably predict the instant of its transition to the limiting state that

determines the lifetime. Currently, there are no regulatory methods for assessing the lifetime of hydraulic turbines at the operation stage. The approach presented in this paper uses the fracture mechanics methods to build a long-term individual forecast of the dangerous development defects in the main elements of hydraulic turbines taking into account design, technological and operational features. The forecast is based on three-dimensional mathematical models that describe the change in the technical condition of the equipment during time under actual operation. The ANSYS software is used for calculations. Models take into account the size and position of detected or possible defects. Crack growth is determined by the combination of low- and high-frequency loads. The critical length of the crack corresponds to the instant of change of the crack development mechanism, when the failure risk increases sharply. Proposed approach can significantly reduce the possibility of unplanned or emergency shutdown of the hydraulic unit due to its destruction during the overhaul period.

Keywords: fracture mechanics; hydraulic turbine; failure; crack; lifetime assessment.

For citation: E.V. Georgievskaia Application of breakdown mechanics for predicting the resource of axial radial hydroturbins // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 71-78. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78.

Introduction

For many years in hydropower dams, especially high dams, have been considered as a main potential source of danger. Little attention was paid to ensuring the reliability and safety of hydraulic equipment. Stable trouble-free operation of the equipment for dozens of years has also contributed to this. Many hydraulic units were put into operation more than 40-50 years ago, and some crossed the 100th anniversary.

At the time of their development computational methods of fluid dynamics, theory of elasticity and fracture mechanics for 3D-dimensional objects with difficult shape, characteristic for elements of hydraulic turbines, have not yet been used. In addition, the technology of manufacturing large parts did not allow minimizing their thickness. As a result, the main lifetime-determining elements of hydraulic turbines had multiple margins on static strength.

However, over time even this surplus margin has become insufficient to keep the equipment operational, as evidenced by the constantly growing list of accidents and incidents at HPP [1-7]. The accident at the Sayano-Shushenskaya HPP in 2009 showed that exhaustion of the lifetime by separate turbine elements can lead to a serious catastrophe that killed many people and caused huge economic damage (Fig. 1).

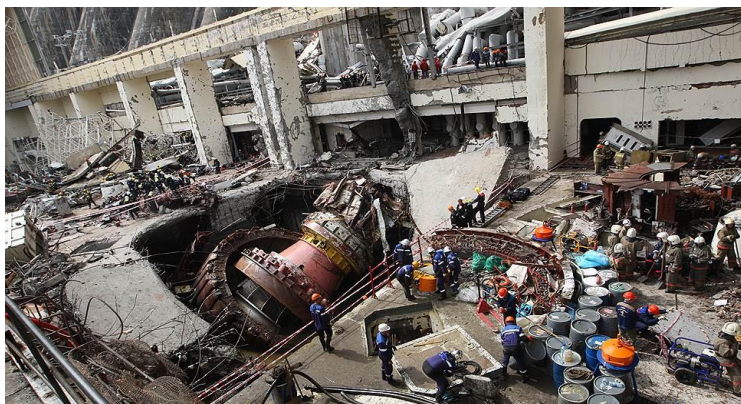
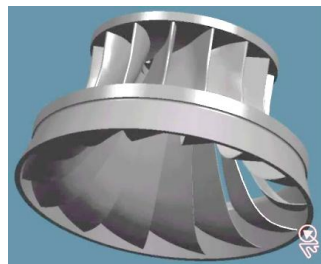


Fig. 1. View of the machine room after the accident

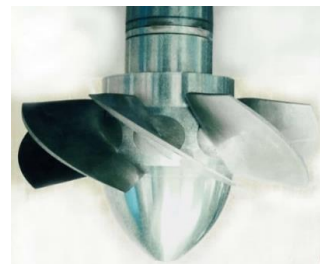
Features of hydraulic turbines operation

Also new renewable energy sources (solar, wind, wave, tidal) have been widely used over the past two decades. These sources are characterized by strong instability of the output power. Therefore, hydraulic units that differed by high maneuverability were forced to significantly change the operating modes. As a result, the number of starts and shutdowns of equipment and the time of its operation at non-optimal capacities increased significantly, large dynamic loads acted on the unit, causing high stresses in its elements.

This problem is especially relevant for Francis turbines. In contrast to Kaplan turbines, whose blades can be rotated to ensure optimal flow through the blades at different operating modes, the runner of the Francis turbine has a rigid connection of the blades to hub and rim (Fig. 2).



a) runner of Francis turbine



b) runner of Kaplan turbine

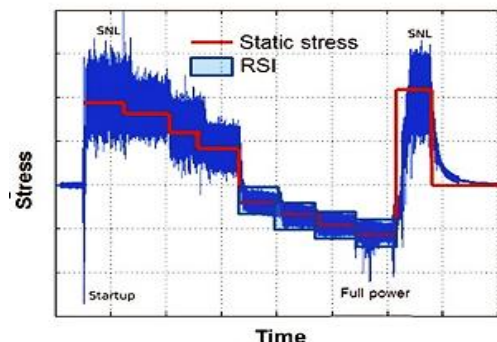
Fig. 2. View of the machine room after the accident

The characteristic pattern of relative dynamic stresses at various operation modes are presented on Fig. 3 for blades based on the results of Francis turbine testing [8].

At many stations this regime changes caused the accelerated growth of fatigue cracks in the unit elements and led to a untimely shutdown of the equipment for carrying out repairs. In Fig. 4 shows some examples of the most characteristic damages of Francis turbine runners - crack in the zone of welding blade to hub.

An important practical task is to predict the time of occurrence of such fatigue damage at actual operation conditions of hydraulic turbines and forecast the kinetics of their growth up to the critical level corresponding to the stage of destruction.

This can be done by calculation estimate of the lifetime, taking into account the features of the structures, the conditions of the actual loading and the material degradation under corrosive environment. Such forecast makes it possible to plan timely repair, reconstruction, modernization or replacement of hydraulic equipment, avoiding failures and accidents with serious consequences.



RSI – Rotor-stator interaction, SNL – speed-no-load

Fig. 3. Fragment of strain gauge recording [8]



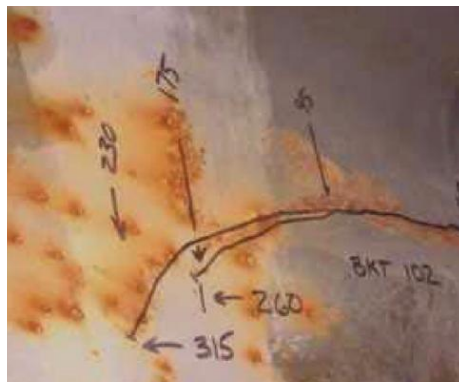
a) Source [3]



b) Source [4]



c) Source [5]



d) Source [2]

Fig. 4. Examples of fatigue damage in Francis turbine runner

The technique of crack growth evaluation

To estimate the time of sustainable crack growth it is proposed to use approach based on the methods of linear fracture mechanics. Now this approach can be realized by modern calculation software products, for example, Ansys. The computational capabilities make it possible to predict the progress of a crack for difficult 3D-dimensional elements of hydro turbines almost without any limitations. The main obstacle is the reliable determination of the dynamic component of the load at various operating modes, especially on non-stationary and transient [9].

The crack growth rate dl/dN is determined by kinetic diagram of fatigue failure (Fig. 5) depending on the magnitude of the stress intensity factor variation ΔK at the crack tip. The well-known Paris empirical equation [10] is the most widespread. It describes well the stage of stable crack growth for many structural materials:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^n, \quad (1)$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot f \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \quad (2)$$

where N – number of cycles; C , n – experimentally defined material characteristics; $\Delta \sigma$ – dynamic stresses variation; f – form coefficient.

A more precise expression are given by different refined equations, for example, (2) – Yarema formula [11], which describes all three stages of crack growth (Fig. 5), but requires knowledge of more constants of the material:

$$\frac{dl}{dN} = C \left[\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_C - K_{\max}} \right]^n, \quad (3)$$

where $K_{\max}$ – the maximum value of the stress intensity factor; K_C , K_{th} – material constants characterizing the viscosity and the threshold value.

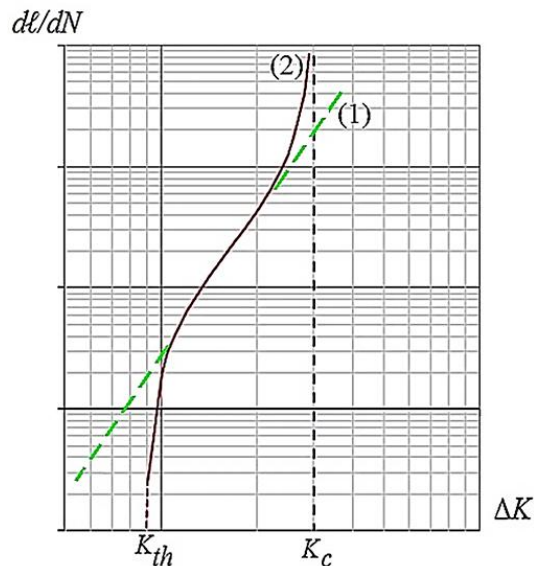


Fig. 5. Kinetic diagram of fatigue failure

Material characteristics C , n differ from each other in formulas (1) and (2).

Some methods of predicting and assessing the risk of defects are presented in the British standard BS 7910:2005 «Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures» [12].

Practical difficulty

In practice, the detection of cracks in the elements of hydraulic turbines is not such a simple task [13-15]. This is due to the following main factors:

- large dimensions of hydraulic units and their components;
- actual sensitivity of non-destructive testing methods (NDT);
- limited accessibility of control sites;
- rare scheduled repairs;
- location of possible defects;
- quality of checked surfaces and the possibility of their careful preparation for control.

Even modern non-destructive inspection methods usually do not allow detecting cracks in hydro turbines at an early stage, until their length has exceeded at least 3–5 mm long. In addition, it is possible subsurface defect grow, which can be detected only by ultrasonic inspection methods. As a result, it can be allowed to operate unit up to next repair with elements that are already damaged. The overhaul period is usually about 5–8 years. Therefore, in order to justify the timing of the next repair and diagnostic, it is necessary to perform a calculation prediction of such possible defects growth.

The forecast is based on mathematical models that describe the change in the distribution of the stress-strain state of a real structure in time under actual operation conditions. The model takes into account the size and position of the detected defects, and also models possible defects that do not exceed the sensitivity level of NDT. The size and location of such defects are chosen on the basis on many year's diagnostic experience and operating characteristics at particular HPP.

The criterion of cracks danger

Curve dependence the crack length ℓ from the operating time T is designed on completed calculation base. The critical crack length ℓ_c corresponds to the instant of time T_c , when a qualitative change in the fracture mechanism occurs.

Low-frequency loads with large amplitude that arise in transient and non-stationary operation modes (see the Fig. 3) are the motive force at the early stages of crack growth. Under their influence the initial defects, which are always present in the material, slowly grow up and reach a threshold value.

Further, the influence of high-frequency loads accompanying the unit's operation at all modes becomes decisive. Despite the small amplitude these loads lead to a rapid destruction of the structure due to a high frequency and high growth rate of defects exceeding the threshold value.

For example, the characteristic frequency of RSI-action (see the Fig. 3) caused by the interaction of the water flow with the fixed and rotating profiles is usually 40-80 Hz for large unit.

Justification of the overhaul period

Schematically, the forecasting process is shown in Fig. 6.

The value of ΔT is determined by the standard interval between repairs, $\ell_{NDT} = \ell(T_{NDT})$ – the minimum crack length that is assuredly detected by NDT, T^* and T^{**} – the instant of previous and current repair respectively. During previous repair the crack was not detected because its length $\ell^* = \ell(T^*)$ was less than ℓ_{NDT} .

The forecast of crack growth from the length ℓ^* to the critical size ℓ_c is constructed on the assumption that the crack expansion was began from the initial defect ℓ_0 and occurred for a long time under the action of actual loads. In our example, the crack will reach a critical value in time interval ΔT_c after the unit is taken out of the last repair.

It is important to note that interval ΔT_c is much less than the standard overhaul interval ΔT . The instant of real failure (the "failure" point) will be determined by the margin factors accepted during the calculation. Typically, the margin factors on the crack length is 2–2.5, and the material viscosity is 1.5.

Failure can occur before the planned output to repair with a high probability. As a result, there is a high risk of an emergency shutdown or equipment damage.

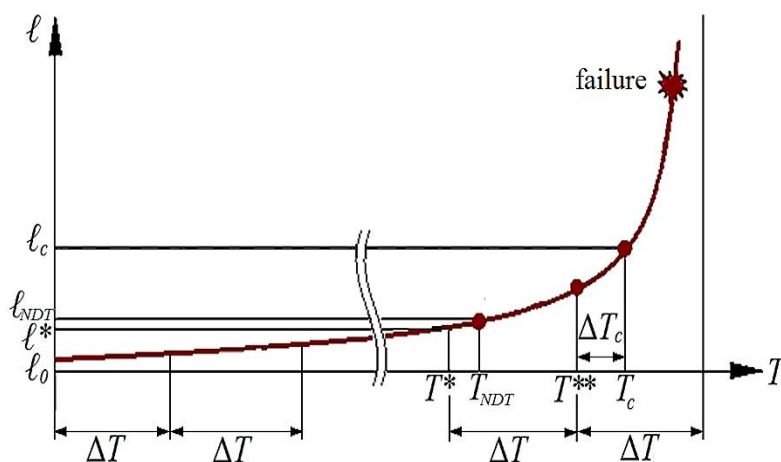


Fig. 6. Forecasting of repairs by technical condition

Conclusion

The proposed approach has a relatively low cost and small time for performing settlement work. At the same time, it allows building long-term forecasts of the hydraulic turbine lifetime and just in time planning repairs or replacement of equipment. This can significantly improve the reliability and safety of HPP operation.

References

1. Georgievskaia E. The lifetime of the hydraulic turbines is the guarantee of reliability and safe operation of HPPs. Analytical review of the literature (Георгиевская Е. Ресурс гидротурбин – гарантия надежности и безопасности эксплуатации ГЭС. Аналитический обзор литературы). LAP Lambert Academic Publishing. 2018. 157 p. ISBN 978-613-6-95791-3 (rus).
2. Liu X., Luo Y., Wang Z. A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54 (2016), p. 1–14. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.025.
3. D. Frunzăverdel, S. Muntean, G. Mărginean, V. Câmpiani, L. Marşavina, R. Terzi, V. Şerban. Failure analysis of a Francis turbine runner // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2010. Vol. 12. P. 012115. doi:10.1088/1755-1315/12/1/012115.
4. Zhou Ye. Technology of monitoring of operating conditions and diagnostics of faults of large hydropower units // VIII STK " Hydropower. New developments and technologies". Reports and speeches. Saint-Petersburg. Publishing house " VNIIG im. B. E. Vedeneeva". 2015. P. 84-97. (rus).
5. Nennemann B., Monette C., Chamberland-Lauzon J. Hydrodynamic damping and stiffness prediction in Francis turbine runners using CFD // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. № 49. P. 072006. doi:10.1088/1755-1315/49/7/072006.
6. Alberto Luna-Ramírez, Alfonso Campos-Amezcu, Oscar Dorantes-Gómez, Zdzislaw Mazur-Czerwiec, Rodolfo Muñoz-Quezada Failure analysis of runner blades in a Francis hydraulic turbine — Case study // *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. P. 314-325. doi:10.1016/j.engfailanal.2015.10.020.
7. Zouhar J., Obrovsky J., Feilhauer M., Skotak A. Case Study and Numerical Analysis of Vibration and Runner Cracks for the Lipno I Hydroelectric Project // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 49. P. 072011. doi:10.1088/1755-1315/49/7/072011.
8. Huang X., Chamberland-Lauzon J., Oram C., Klopfer A., Ruchonnet N. Fatigue analyses of the prototype Francis runners based on site measurements and simulations // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 22. № 1. Pp. 12014-12021(8). doi:10.1088/1755-1315/22/1/012014.
9. Georgievskaia E.V. The energy approach for assessment of dynamic stresses in hydraulic turbines // *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2017. № 4. C. 88-97. (rus). doi 10.18721/JEST.230408.
10. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // *Journal of Basic Engineering* (Trans. ASME). 1963. No. 12. P. 528-534.
11. Yarema S.Ya. Correlation of the parameters of the Paris equation and the cyclic crack resistance characteristics of materials // *Strength of Materials*. 1981. V. 13, no. 9. P. 20-28.
12. BS 7910:2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
13. Boukani H. Habibzadeh, Viens M., Tahan S.A., Gagnon M. On the performance of nondestructive testing methods in the hydroelectric turbine industry // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 22. № 1. Pp. 12018-12025. doi:10.1088/1755-1315/22/1/012018.
14. Trudel A.; Sabourin M. Metallurgical and fatigue assessments of welds in cast welded hydraulic turbine runners // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 22. № 1. Pp. 12015-12025(11). doi.org/10.1088/1755-1315/22/1/012015.
15. Thibault D., Gagnon M., Godin S. Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 22, Number 1, 2014, pp. 12019-12029(11). doi:10.1088/1755-1315/22/1/012019.

Авторы публикации

Георгиевская Евгения Викторовна – канд. физ.-мат. наук, заведующая лабораторией прочности турбин ТЭС, АЭС и ГЭС, ОАО «НПО ЦКТИ».

Authors of the publication

Georgievskaiа Evgeniia – Ph.D. (Physics & Mathematics), Head of the Turbine Strength Test Laboratory for the Thermal, Nuclear and Hydro Power Plants, JSC «NPO CKTI».

Поступила в редакцию

31 мая 2018 г.



ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ОБОРОТОВ ПРОПЕЛЛЕРНОЙ МЕШАЛКИ НА СКОРОСТЬ ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИДОВ МАСЛЯНОЙ ФРАКЦИИ В РЕАКТОРЕ СМЕШЕНИЯ

Р.Е. Липантьев, В.П. Тутубалина

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8923-2865>, dozor_energo@mail.ru

Резюме: Исследовано влияние числа оборотов пропеллерной мешалки на концентрацию сульфоксидной серы в масляной фракции арланской нефти при окислении сульфидов этой фракции пероксидом водорода в присутствии кислого катализатора – смеси муравьиной и серной кислот – в реакторе смешения. Экспериментально получены зависимости концентрации сульфоксидной серы в масляной фракции и скорости реакции окисления сульфидов фракции в сульфоксиды от интенсивности перемешивания гетерогенной смеси в реакторе смешения.

Ключевые слова: масляная фракция, окисление, сульфоксиды, реактор.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-79-83

Для цитирования: Липантьев Р.Е., Тутубалина В.П. Влияние числа оборотов пропеллерной мешалки на скорость окисления сульфидов масляной фракции в реакторе смешения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 79-83. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-79-83.

EFFECT OF PROPELLER MIXER TURNS NUMBER ON THE SULFIDES OXIDATION RATE IN THE OIL PHASE IN A MIXING REACTOR

R.E. Lipantyevev, V.P. Tutubalina

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8923-2865>, dozor_energo@mail.ru

Abstract: The effect of the rotation number of the propeller mixer on the concentration of sulfoxide sulfur in the oil fraction of Arlan oil during the oxidation of this fraction sulfides with hydrogen peroxide along with an acid catalyst, a mixture of formic and sulfuric acids in a mixing reactor, was studied. The dependences of the concentration of sulfoxide sulfur in the oil fraction and the reaction rate of the oxidation of the fraction sulfides to sulfoxides are obtained experimentally depending on the intensity of heterogeneous blend mixing in the blending reactor

Key words: oil fraction, oxidation, sulfoxides, reactor.

For citation: R.E. Lipantyevev, V.P. Tutubalina Effect of propeller mixer turns number on the sulfides oxidation rate in the oil phase in a mixing reactor // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 79-83. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-79-83.

Введение

Основой технологии производства нефтяных сульфоксидов из нефтяного сырья является селективное окисление сераорганических соединений фракций нефти пероксидом водорода с последующим выделением образовавшихся продуктов окисления экстракцией. Рассматриваемые процессы протекают в гетерогенных системах жидкость-жидкость в реакторах смешения [1, 2].

Задачей настоящего исследования является определение оптимальной скорости вращения механической мешалки, обеспечивающей высокую интенсивность массообменного процесса, протекающего в гетерогенной системе жидкость-жидкость.

Основные результаты работы

Исследование влияния скорости перемешивания на процесс образования сульфоксидов проводили на примере масляной фракции арланской нефти с содержанием сульфидной серы, равным 0,77 %. Окисление сульфидной серы осуществляли 30%-ным раствором пероксида водорода в количествах, эквивалентных содержанию сульфидной серы во фракции [2, 4, 5].

Скорость вращения механической пропеллерной мешалки [3] изменяли в широком интервале от 1,5 до 15 об/с. Температура в реакторе смешения поддерживалась постоянной при помощи термостата и составляла 80 °С в течение проведения эксперимента. Данная температура обеспечивала превращение сульфидной серы в сульфоксидную [2, 4]. Продолжительность пребывания масляной фракции в реакторе смешения составляла 10 мин. В качестве катализатора в исследуемой системе использовали смесь муравьиной и серной кислот в соотношении 1:1, взятых в количестве 0,1 моль на 1 г-атом сульфидной серы масляной фракции [6, 7]. Полученные в ходе эксперимента данные представлены на рис. 1, 2.

Зависимость выхода сульфоксидов от скорости вращения пропеллерной мешалки показана на рис. 1.

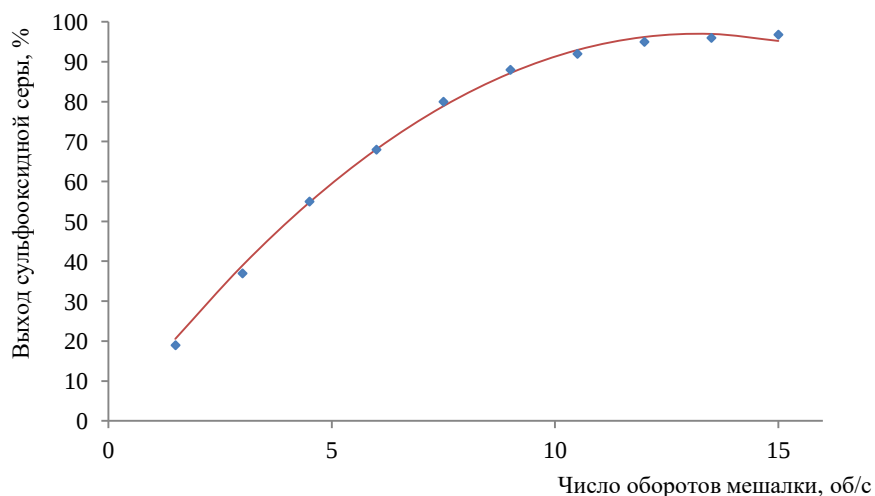


Рис. 1. Зависимость выделения сульфоксидной серы в масляной фракции от числа оборотов мешалки в реакторе смешения

В соответствии с данными рис. 1 количество образовавшихся сульфоксидов определяется скоростью диффузии пероксида водорода в масляную фракцию, поэтому скорость перемешивания гетерогенной системы масляная фракция – пероксид водорода

относится к основным факторам, увеличивающим скорость диффузии пероксида водорода в масляной фракции [8–10].

Математическое описание полученных экспериментальных данных, представленных на рис. 1, 2, производилось при помощи программного продукта *Advanced Grapher*. Изменение концентрации сульфоксидной серы в масляной фракции от числа оборотов мешалки (w) описывается следующим уравнением (рис. 1.):

$$S_{SO} = -0,558 \cdot w^2 + 14,736 \cdot w - 0,293.$$

Из рис. 1. видно, что с увеличением интенсивности вращения пропеллерной мешалки от 1,5 до 13,3 об/с содержание сульфоксидной серы в масляной фракции растет. Так, повышение числа оборотов мешалки от 13,3 до 15,0 об/с увеличивает содержание сульфоксидной серы в масляной фракции всего на 0,3 %, поэтому повышать число оборотов мешалки свыше 13,3 об/с нецелесообразно. Оптимальное число оборотов мешалки обеспечивает максимальный выход сульфоксидной серы в масляной фракции, равный 98,2 %.

Зависимость скорости реакции образования сульфоксидов (r) от интенсивности перемешивания показана на рис. 2.

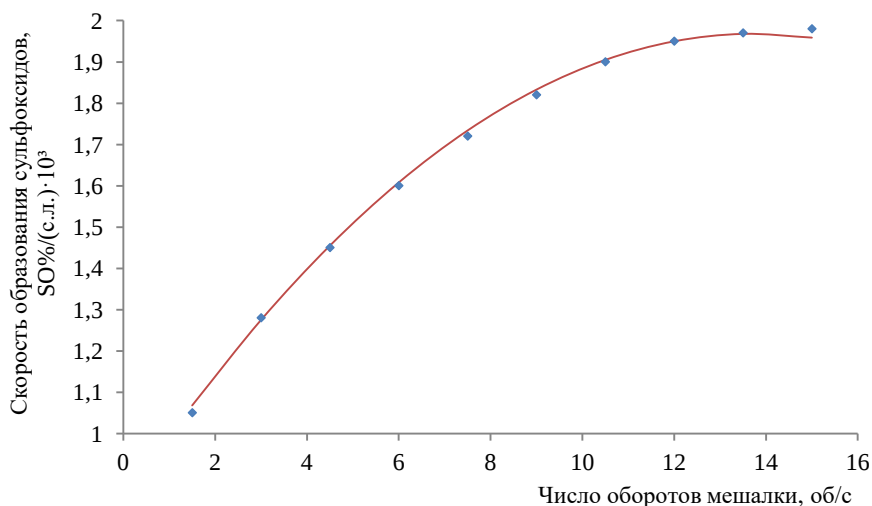


Рис. 2. Зависимость скорости образования сульфоксидов от интенсивности вращения мешалки

По экспериментальным данным рис. 2 можно записать зависимость для скорости образования сульфоксидов в масляной фракции арланской нефти:

$$r = -0,006 \cdot w^2 + 0,165 \cdot w + 0,834.$$

В соответствии с данными рис. 2 интенсивность вращения мешалки оказывает существенное влияние на скорость образования сульфоксидов в широком интервале перемешивания от 1,5 до 13,3 об/с. В данном интервале скорость образования сульфоксидов возрастает от $1,078 \cdot 10^{-3}$ до $1,975 \cdot 10^{-3}$ SO%/с.л., т.е. в 1,83 раза, или на 83 %. Дальнейшее увеличение интенсивности вращения мешалки до 15 об/с и выше способствует росту скорости образования сульфоксидов всего на 0,15 %.

Обсуждение результатов работы

Таким образом, интенсивность перемешивания, равная 13,3 об/с, позволяет получить максимальную скорость образования сульфоксидов, достигающую $1,975 \cdot 10^{-3}$ SO%/с.л. В связи с этим данную скорость следует считать оптимальной, т.к. она позволяет превратить до 98,2 % сульфидной серы масляной фракции в сульфоксиды.

Выводы

1. Изучено влияние интенсивности перемешивания на выход сульфоксидов в процессе окисления сульфидов масляной фракции арланской нефти пероксидом водорода в присутствии смеси муравьиной и уксусной кислот.
2. Установлена зависимость скорости образования сульфоксидов в масляной фракции от интенсивности перемешивания реакционной смеси пропеллерной механической мешалкой в интервале от 1,5 об/с до 13,3 об/с.
3. Найдены зависимости концентрации сульфидной серы в масляной фракции и скорости образования сульфоксидов от числа оборотов пропеллерной мешалки в реакторе смешения.

Литература

1. Акопян А.В. Окислительное обессеривание углеводородного сырья пероксидом водорода в присутствии солей переходных металлов: дис. канд. техн. наук: 02.00.13 / Акопян Аргам Виликович. Москва, 2015. 228 с.
2. Караулова Е.Н. Химия сульфидов нефти. М.: Наука, 1970. 136 с.
3. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2014. 1758 с.
4. Тутубалина В.П. Сероорганические соединения нефтяных фракций и методы их выделения. Монография. М.: ЦНИИ, 1995. №92. 106 с.
5. Мустафин Х.В. Технология производства нефтяных сульфоксидов: дис. канд. техн. наук: 05.17.04 / Мустафин Харис Вагизович. Казань, 2000. 134 с.
6. Липантьев Р.Е. Влияние режимных параметров на коэффициент массоотдачи в процессе окисления сульфидов масляной фракции пероксидом водорода / Липантьев Р.Е., Харлампыди Х.Э., Тутубалина В.П. // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т.20, №11. С. 36–40.
7. Зарифянова М.З., Вафина С.Д., Тунцева С.Н., Валиуллина Р.Р. Экстракция нефтяных сульфоксидов из оксидатов дизельных фракций изопропиловым спиртом // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т.15, №17. С. 218–219.
8. Verschuren I.L.M. Effect of mixing on the product quality in semi-batch stirred tank reactors / I.L.M. Verschuren, J.G. Wijers, J.T.F. Keurentjes, A.I.Ch.E. J. (2001). V47, (8). P.1731–1739.
9. Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П., Харлампыди Х.Э. Сераорганические соединения масляной фракции арланской нефти // Вестник технологического университета. 2017. Т.20. №10. С. 67–69.
10. Wimer D.C. Titration of sulfoxide in acetic anhydride // Analytical Chem. 1958. V. 30. P. 2060.

Авторы публикации

Липантьев Роман Евгеньевич – канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Инженерная экология и рациональное природопользование» (ИЭР) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Тутубалина Валерия Павловна – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Akopyan A.V. Oxidative desulfurization of hydrocarbon raw materials with hydrogen peroxide in the presence of salts of transition metals: the dissertation of a Cand.Tech.Sci 02.00.13 / Akopyan Argam Vilikovich. Moscow, 2015. 228 p.
2. Karaulova E.N. Chemistry of oil sulphides. Moscow: Nauka, 1970. 136 p.
3. Ainstein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. Processes and apparatus of chemical technology. General course. M.: Bean. Laboratory of Knowledge, 2014. 1758 p.

4. Tutubalina V.P. Serogorganic compounds of petroleum fractions and methods for their isolation. Monograph. Moscow: Central Research Institute, 1995. №92. 106 p.

5. Mustafin H.V. Technology of production of petroleum sulfoxides: the dissertation of a Cand.Tech.Sci. : 05.17.04 / Mustafin Haris Vagizovich. Kazan, 2000. 134 p.

6. Lipantiev R.E. The effect of regime parameters on the mass transfer coefficient in the process of oxidation of sulfides of the oil fraction with hydrogen peroxide / Lipant'ev R.E., Kharlampidi Kh.E., Tutubalina V.P. // Bulletin of Kazan Technological University. 2017. T.20, № 11. P. 36–40.

7. Zarifyanova M.Z., Vafina S.D., Tuntseva S.N., Valiullina R.R. Extraction of petroleum sulfoxides from oxidates of diesel fractions with isopropyl alcohol // Bulletin of Kazan Technological University. 2012. T.15, №17. C. 218–219.

8. Verschuren I.L. M. Effect of mixing on the product quality in semi-batch stirred tank reactors / I.L. M. Verschuren, J.G. Wijers, J.T. F. Keurentjes. A.I.Ch.E. J. (2001). V.47, (8). P.1731–1739.

9. Gainullina L.R., Tutubalina V.P., Kharlampidi H.E. Seraorganic compounds of the oil fraction of Arlan oil // Bulletin of the Technological University. 2017. T.20, №10. from. 67–69.

10. Wimer D.C. Titration of sulfoxide in acetic anhydride // Analytical Chem. 1958. V. 30. P. 2060.

Authors of the publication

Roman E. Lipant'ev – PhD (Techn) Sci, lecturer Department Engineering Ecology and Rational Nature Management, Kazan State Energy University.

Valeria P. Tutubalina – Doc. Sci. (Techn.), Professor, Chief Researcher, Kazan State Energy University.

Поступила в редакцию

28 февраля 2018 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 338.45:621.311

УЧАСТИЕ НАСЕЛЕНИЯ И ПРИРАВНЕННЫХ К НЕМУ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РЕГУЛИРОВАНИИ ГРАФИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЭ

А.А. Наумов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: приведен анализ экономических последствий использования населением Республики Татарстан и приравненными к нему потребителями одноставочного однозонного тарифа и одноставочного двухзонного тарифа за потребленную электрическую энергию. Сделан вывод о необходимости принятия в РТ дифференцированных по временным зонам тарифов, стимулирующих потребителей к участию в регулировании графика нагрузки электроснабжающих организаций, способствующих энергосбережению и улучшению экологического состояния региона. Приведено сравнение экономического эффекта при использовании населением различных тарифов по 8 регионам Российской Федерации.

Ключевые слова: электрическая энергия, тариф, график нагрузки, население и приравненные к нему потребители.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-84-91

Для цитирования: Наумов А.А. Участие населения и приравненных к нему потребителей в регулировании графика потребления ЭЭ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 84-91. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-84-91.

PARTICIPATION OF POPULATION AND EQUATED CONSUMERS IN REGULATION OF ENERGY CONSUMPTION SCHEDULE

A.A. Naumov

Kazan State Power-Engineering University, the city of Kazan, Russia

Abstract: The analyses of economic impact following the application by the Republic of Tatarstan population and equated consumers of straight-line one-zone tariff and straight-line two-zone tariff for the consumed electric energy is provided. The conclusion is made on necessity of tariffs adoption in the RT differentiated by the time zones and to incentivize the consumers to participate in regulating the load schedule of the electric energy suppliers, to facilitate energy saving and improving nature protecting conditions in the region. The comparison of economic results from application of different tariffs by population in 8 Russian Federation regions is provided.

Key words: electric energy, tariff, load schedule, population and equated consumers

For citation: *A.A. Naumov Participation of population and equated consumers in regulation of energy consumption schedule // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 84-91. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-84-91.*

Введение

Ранее [1, 2] обсуждались вопросы целесообразности стимулирования потребителей к переходу на расчеты с энергоснабжающими организациями (ЭСО) за потребленную электрическую энергию (ЭЭ) по тарифам, дифференцированным по зонам суток. Фактически – это вовлечение потребителей в процессы регулирования графика нагрузки, с целью снижения потребления энергии в часы максимума нагрузки энергосистемы, переноса части потребления на часы минимальной или неполной нагрузки энергосистемы, что способствует выравниванию ее графика нагрузки. При равномерном режиме работы себестоимость единицы ЭЭ минимальна, так как оборудование работает в "щадящем" режиме, отсутствует необходимость содержания резервных мощностей на электрических станциях, выравнивающих общие нагрузки в сети. Следовательно удельные расходы топлива наименьшие, что положительно сказывается и на экологии.

На практике режим работы ЭСО имеет ярко выраженный нелинейный характер с максимумом нагрузки в дневные и минимумом – в ночные часы. Для выравнивания графика нагрузки используются различные методы: на промышленных предприятиях работа в ночную смену; использование, когда это возможно, мощных энергетических установок при минимуме нагрузки энергосистемы и т.д.

Основная часть

Как показывает практика, самым эффективным методом влияния на выравнивание графика нагрузки является не распоряжения и призывы к энергосбережению, а использование экономических стимулов для потребителей: понижение стоимости единицы энергии в ночные часы и ее повышение в часы максимума нагрузки. Именно в этом и состоит суть тарифной политики, направленной на энергосбережение и сохранение природных ресурсов. С этой целью потребителю предоставляется возможность выбора различных тарифных планов: однозонного тарифа, неизменного в течение суток; тарифа, дифференцированного по двум зонам суток (день – с 7 до 23 ч., ночь с 23 до 7); трехзонного (ночь, утренний и вечерний пики, а также полупик). Промышленностью выпускаются счетчики электрической энергии и информационно-измерительные системы, программируемые для расчетов за потребленную энергию отдельно по временным интервалам.

Ниже приведены результаты анализа последствий использования однозонного или двухзонного тарифов населением, проживающим в городских населенных пунктах в домах, не оборудованных в установленном порядке стационарными электроплитами и (или) электроотопительными установками, и приравненным к нему категориям потребителей Республики Татарстан (РТ).

С 2011 года в РТ обязанность установления тарифов на ЭЭ возложена на Государственный комитет Республики Татарстан по тарифам. Интервалы тарифных зон суток ежегодно утверждаются (по месяцам календарного года) Федеральной антимонопольной службой. На первое и второе полугодия 2018 года тарифы утверждены Государственным комитетом по тарифам Республики Татарстан в декабре 2017 года постановлением 3-7/э [3].

Следует отметить, что вплоть до 2011 года действовала совершенно понятная для населения система определения стоимости потребленной ЭЭ: достаточно было перейти на двухзонную систему оплаты, и за 1 кВтч, потребленный ночью, можно было платить в два раза меньше, чем за единицу энергии, потребленную днем, или при оплате по однозонному

тарифу. Это было связано с тем, что дневной тариф равнялся однозонному тарифу, а ночной был равен половине дневного тарифа. Фактически применялась скидка к ночному тарифу в размере 50 % от дневного тарифа. Поэтому многие бытовые потребители приобрели многотарифные счетчики и заключили соответствующие договора с энергосбытовыми организациями и старались, по возможности, использовать электрические аппараты с 23 до 7 часов.

Но с 2012 года в РТ ситуация изменилась: однозонный тариф перестал быть равен дневному, а соотношение между ночным и дневным тарифом уменьшилось, в 2018 году он составляет 1,6. В этой связи следует оценить экономическую целесообразность выбора для населения различных тарифов и последствия такого выбора для энергоснабжающих организаций.

Ниже приведен анализ финансовых последствий перехода населения РТ и приравненных к нему потребителей на различные виды тарифов в первой половине 2018 г.

Согласно действующим в первой половине 2018 г. тарифам, при равномерной нагрузке разница в платежах при использовании однозонного и двухзонного тарифов составляет для непрерывно используемой в течение суток мощности в 1 кВт всего 8 копеек (около 0,09 %) в сутки: 85,44 руб. если расчет производить по однозонному тарифу и 85,36 руб. – по двухзонному тарифу.

Проблема состоит в том, что распределение объемов потребления ЭЭ населением в течение суток сильно отличается. Так, в крупных городах для многоквартирных домов, не оборудованных в утвержденном порядке стационарными электрическими плитами и (или) электроотопительными установками, в ночные часы потребление оценивается в 25–30 %, около 45 % – в полупик и около 30 % – в часы пиковой нагрузки. Эти цифры меняются во времени года в зависимости от продолжительности светлого времени суток. В домохозяйствах со стационарными электроплитами и электроотопительными установками потребление может достигать 40–50 %.

Были выполнены расчеты зависимости суточных платежей населения РТ от видов тарифов для первой половины 2018 года. При использовании однозонного тарифа плата составляет $T_1 E_1$ рублей, где T_1 – однозонный тариф, руб./кВт·ч; E_1 – суточный объем потребления ЭЭ (кВт·ч). Для двухзонного тарифа плата равна $T_d E_d + T_n E_n$, где T_d , T_n – дневной и ночной тарифы; E_d , E_n – объемы потребления ЭЭ в дневной и ночной периоды соответственно.

На рис. 1 показаны изменения суточных платежей населения РТ в рублях при изменении времени использования нагрузки 1 кВт в ночные часы. Видно, что если непрерывно в течение 24 часов использовать электроприбор мощностью 1 кВт (8 часов в ночные и 16 – в дневные часы), платы по одноставочному однозонному и двухзонному тарифам практически не отличаются (как указано выше, разница составляет 0,09 %).

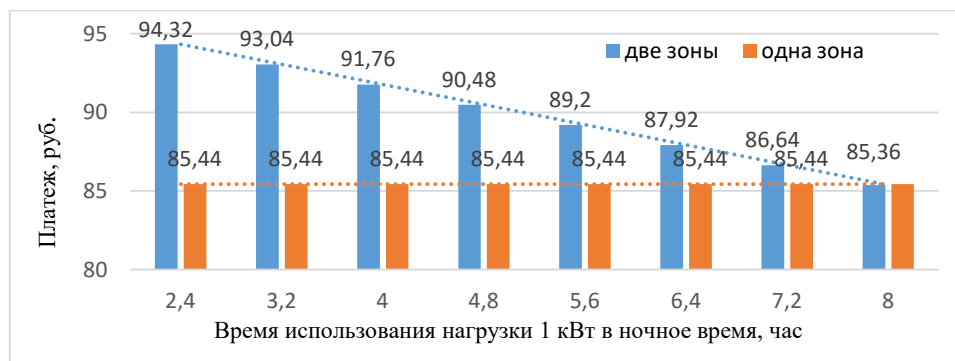


Рис. 1. Зависимость платежей за потребленную ЭЭ нагрузкой 1 кВт при использовании однозонной и двухзонной систем оплаты

Если уменьшить время использования электрической нагрузки в ночное время за счет использования ее в дневные часы, плата по двухзонной системе заметно возрастет.

На рис. 2 показана зависимость изменения платежей населением РТ и приравненными к нему потребителями, рассчитанных для одноставочного дифференцированного по двум зонам суток тарифа в зависимости от отношения объемов потребления ночь/день, при неизменном суточном потреблении энергии. С учетом того, что потребленная энергия в зоне равна произведению количества зонных часов, умноженному на среднюю мощность в зоне, а дневной период (с 7 до 23 ч – 16 ч) в 2 раза больше, чем ночной (с 23 до 7 – 8 ч), отношение $E_n/E_d = 100\%$ означает, что средняя мощность используемых в ночную зону электроустановок в два раза больше, чем в дневную зону. При равномерной в течение суток нагрузке отношение $E_n/E_d = 50\%$. При $E_n/E_d = 25\%$ мощность ночью равна половине дневной мощности ($P_n = 0,5P_d$), при отношении $E_n/E_d = 0\%$ – потребление ночью отсутствует.

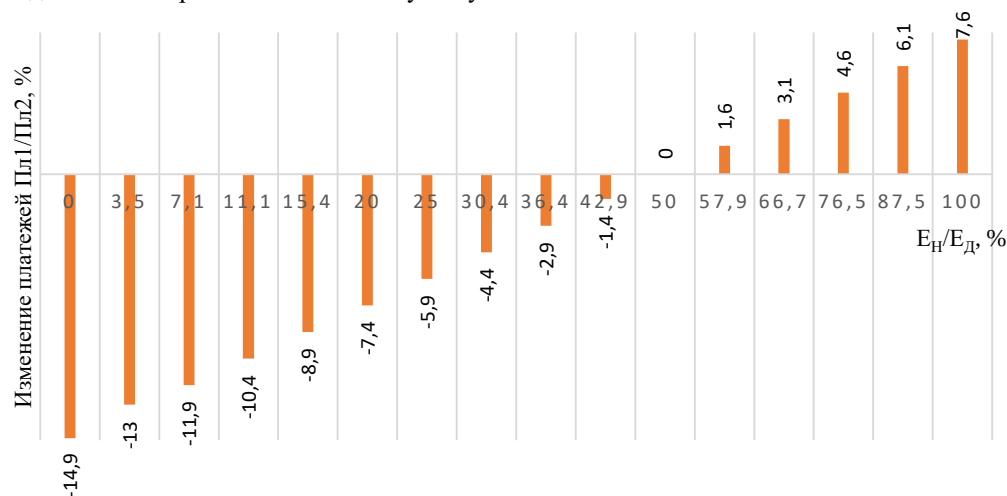


Рис. 2. Отношение платежей населения по одноставочному однозонному тарифу к одноставочному двухзонному тарифу (%) в зависимости от отношения объемов потребления ночь/день

При отсутствии потребления в ночной зоне, использовании двухзонной системы оплаты, суточный платеж $Пл2$ превышает платеж, использующий однозонную систему оплаты $Пл1$ на 14,9 %. Если принять, что в ночной период потребление равно 25 % суточного потребления (мощность электроприборов ночью в два раза меньше, чем днем), то переплата при использовании двухзонного тарифа, по сравнению с однозонной системой оплаты, составляет около 6 %.

С целью экономии потребитель может попытаться уменьшить количество и мощность используемых днем электрических устройств, включая их в ночной период. В частности, можно стиральные и посудомоечные машины, зарядные устройства аккумуляторов гаджетов, частично нагреватели и кондиционеры, другие электрические приборы использовать в ночное время. Их относительный вклад в общий расход электрической энергии значителен, но не бесконечен, так как холодильник, освещение, уют, пылесос, телевизор, кухонные электрические приборы (чайники, кофеварки, миксеры и т.д.) вряд ли возможно использовать лишь в ночные часы. Но даже допустив, что половину энергии удастся с дневного интервала перенести на ночь, достигнув равенства потребления энергии в ночную и дневные зоны, типовому потребителю все равно невозможно получить выгоду, он лишь сможет приблизиться к нулевым потерям от использования двухдиапазонного тарифа. Для получения экономии необходимо, чтобы расход энергии ночью превышал дневной расход. В пределе, если не включать электрические приборы днем, а только ночью (с 23 до 7), можно достигнуть экономии в

платежах 7,6 %. Но совершенно очевидно, что такая ситуация абсурдна и в реальной жизни практически не реализуема.

Использование трехзонного тарифа, где расчет суточного потребления выполняется по формуле $T_{п}E_{п} + T_{пп}E_{пп} + T_{н}E_{н}$ (где $E_{п}$, $E_{пп}$ – объемы потребления, кВт·ч, в пиковый и полупиковый периоды; $T_{п}$, $T_{пп}$ – пиковый, полупиковый тарифы), существенного влияния на относительные платежи не оказывает. При равномерной нагрузке и расчетах по трехзонному тарифу в первой половине 2018 года в РТ плата населения составляет 83,12 рубля.

Следовательно, при действующих в 2018 году тарифах население РТ экономически не стимулируется к использованию дифференцированных по времени суток систем оплаты за ЭЭ и участию в регулировании графика потребления ЭЭ.

Для сравнения проведены расчеты платежей в первой половине 2018 года в восьми регионах Российской Федерации (РФ), близких РТ по социально-экономическому развитию [4–10]. Для Нижегородской области использованы тарифы на электроэнергию, потребленную сверх социальной нормы.

На рис. 3 показаны зависимости относительных увеличений/уменьшений платежей при переходе от однозонных к двухзонным тарифам (при неизменном суточном потреблении ЭЭ) от соотношения потребленных энергий в дневную и ночную зоны, рассчитанные для населения, проживающего в городских населенных пунктах в домах, не оборудованных в установленном порядке стационарными электроплитами и (или) электроотопительными установками, и приравненных к нему потребителей.

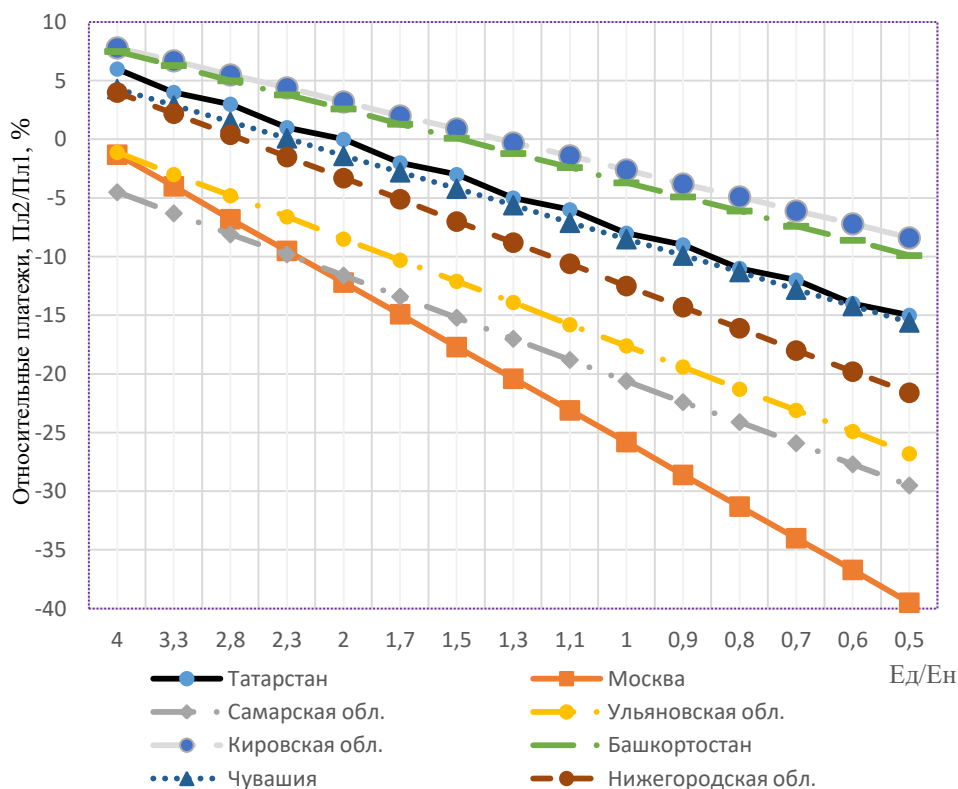


Рис. 3. Изменение оплаты населения за ЭЭ при переходе от однозонного к двухзонному тарифу для регионов Российской Федерации

Видно, что в пяти рассмотренных регионах при равномерной в течение суток нагрузке ($E_{д}/E_{н} = 2$) наблюдается уменьшение платежей (Чувашия -1,4 %, Самарская

область -3,3 %, Ульяновская область -8,5 %, Самарская область -11,6 %, Москва -12,2 %) при использовании двухзонной, по сравнению с однозонной, системы оплаты. Для РТ, как отмечалось выше, платеж остается практически неизменным. Для населения Кировской области и Башкортостана переход на двухзонную оплату приводит к увеличению платежей на +3,2 % и +2,6 % соответственно.

При типовом значении ночного потребления 0,25 % ($E_d/E_n = 4$) в трех регионах (Самарская область, Ульяновская область, Москва) население не заинтересовано в отказе от более гибкого двухзонного тарифа, так как даже в этом случае тарифами поддерживается хоть и незначительный (от -1,1 до -4,5 %), но более низкий платеж по сравнению с платежами по однозонным тарифам. В других регионах, включая РТ, использование тарифа, дифференцированного по двум временным зонам, для населения и приравненных к нему потребителей с финансовой точки зрения нецелесообразно.

Если довести объем потребления энергии в ночные часы до значения, в два раза превышающего объем дневной электроэнергии, то можно получить значительную экономию в платежах: в Москве -40 %, в Самарской области -30 %, в Ульяновской -27 %, Нижегородской -22 %, Чувашии -16 %, республике Башкортостан -10 %, Кировской области -8 %. В Татарстане выигрыш может составить 15 %. Ситуация аналогична и во второй половине 2018 года.

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**.

1. Современная тарифная политика в Республиках Татарстан, Башкортостан, Кировской области не является стимулирующей для привлечения населения к участию в регулировании графика электропотребления и, в конечном счете, экономии энергоресурсов.

2. Потребителям выгоднее переходить на однозонный тариф, даже имея современные счетчики и автоматизированные системы коммерческого учета ЭЭ с возможностью учета потребленной ЭЭ раздельно в разные интервалы времени.

3. Потребители, вновь устанавливающие или заменяющие счетчики ЭЭ, не имеют материальных стимулов к приобретению счетчиков, позволяющих учитывать энергию раздельно в разные интервалы времени, что создает, и будет в дальнейшем создавать, проблемы по привлечению населения к выравниванию графика нагрузки энергосистем.

Заключение

1. Для привлечения бытовых потребителей к энергосбережению в РТ, Кировской области, республике Башкортостан следует пересмотреть тарифную политику в отношении населения.

2. Увеличить отношение тарифов в дневной и ночной зоне.

3. При установлении тарифов учитывать опыт регионов, использующих материальные стимулы для привлечения населения к участию в регулировании графика электропотребления, в том числе введение социальной нормы потребления (например, размер социальной нормы для населения в Нижегородской области установлен в 50 кВт·ч в месяц на одного человека), возможно в определенные часы. Стоимость электроэнергии в рамках социальной нормы должна быть гораздо ниже, чем цена сверхнормативного электричества, что особенно важно для малообеспеченных граждан.

Литература

1. Наумов А.А. О возможных последствиях перехода на тарифы, дифференцированные по зонам суток в РТ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. №3-4. С. 62–66.
2. Наумов А.А., Агеев Ш.Р. Целесообразность применения одно- или двухставочного тарифа на электроэнергию в РТ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 5-6. С. 63–67.
3. Постановление Государственного комитета Республики Татарстан по тарифам 3-7/э от 08.12.2017. Об установлении цен (тарифов) для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Республике Татарстан на 2018 год. [Электронный ресурс]; // http://kt.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_1201226.pdf (дата обращения 25.02.2018).

4. Приказ департамента экономической политики и развития (ДЭПиР) г. Москвы от 29.11.2017 № 323-ТР. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей города Москвы на 2018 год. [Электронный ресурс]; <http://mosenergosbyt.info/tarify/>.

5. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненным к населению категориям потребителей в Ульяновской области на 2018 год / Приказ Министерства развития конкуренции и экономики Ульяновской области №06-587 от 14.12.2017. [Электронный ресурс]; <http://tarif.ekonom73.ru/law/6523.html>.

6. Решение региональной службы по тарифам Кировской области № 48/13-ээ-2018 от 29.12.2017. О тарифах на электрическую энергию для населения и приравненным к нему категориям потребителей по Кировской области на 2018 год. [Электронный ресурс]; <http://www.rstkirov.ru/documents/resheniya/resheniya-za-2017-god/>.

7. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Республике Башкортостан на 2018 год / Постановление Государственного комитета республики Башкортостан по тарифам РБ № 560 от 11.12.2017 г. [Электронный ресурс]; <https://www.bashesk.ru/tariffs/current/>.

8. Приказ Минэкономразвития Республики Марий Эл от 19 декабря 2017 г. № 137 т. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Республике Марий Эл на 2018 год. [Электронный ресурс]; <https://tarif-24.ru/russia/electro/2018/456-tarify-na-elektroenergiyu-dlya-respubliki-marij-el-s-1-iyulya-2018-goda.html>.

9. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), поставляемую населению и приравненным к нему категориям потребителей, по Чувашской Республике на 2018 год / Постановление № 118-24/э от 12.12.2017 Государственной службы Чувашской Республики по конкурентной политике и тарифам. [Электронный ресурс]; <http://tarif.cap.ru/usercontent/tarif/sitemap//12.pdf>.

10. Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения, проживающего в Нижнем Новгороде и городских населенных пунктах Нижегородской области в домах, оборудованных газовыми плитами / Решение региональной службы по тарифам Нижегородской области № 67/1 от 20.12.2017 г. [Электронный ресурс]; https://energovopros.ru/spravochnik/electrosnabzhenie/tarify-na-elektroenergiyu/nizhegorodskaya_oblast/40977/.

Автор публикации

Наумов Анатолий Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Reference

1. Naumov A.A. On possible results of transfer to the tariffs differentiated by the time zones in RT // Bulletin of the Universities. Power-engineering issues. 2005. No3-4. P. 62–66.

2. Naumov A.A., Ageev Sh.R. Expediency of the straight-line or two-part tariff application for electric energy in the RT // Bulletin of the Universities. Power-engineering issues. 2005. No 5-6. P. 63–67.

3. Resolution of the State Committee of the Republic of Tatarstan on tariffs 3-7/э of 8.12.2017. On prices (tariffs) for population and equated consuming categories establishment in the Republic of Tatarstan for the year 2018. [Electronic resource]; // http://kt.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_1201226.pdf (access date 25.02.2018).

4. Order of the Moscow Department of Economic Policy and Development of 29.11.2017 No 323-TP On the electric energy prices (tariffs) for population and equated consuming categories establishment in the city of Moscow for the year 2018. [Electronic resource]; <http://mosenergosbyt.info/tarify/>.

5. On the electric energy prices (tariffs) for population and equated consuming categories establishment in the Ulyanovskaya region for the year 2018 / The Order of the Ministry of Competition

development and Economics of the Ulyanovskaya region No 06-587 of 14.12.2017. [Electronic resource]; <http://tarif.ekonom73.ru/law/6523.html>.

6. The Kirov regional service on tariffs Decision No 48/13-ээ-2018 of 29.12.2017. On tariffs for electric energy for population and equated consuming categories in Kirovskaya region for the year 2018. [Electronic resource]; <http://www.rstkirov.ru/documents/resheniya/resheniya-za-2017-god/>.

7. On the electric energy prices (tariffs) for population and equated consuming categories establishment in the Republic of Bashkortostan for the year 2018./ Resolution of the State Committee of the Republic of Bashkortostan on tariffs. RB No 560 of 11.12.2017 [Electronic resource]; <https://www.bashesk.ru/tariffs/current/>.

8. The Order of the Ministry of Economic Development of the Republic of Mari El of December 19, 2017. No 137. On the electric energy prices (tariffs) for population and equated consuming categories establishment in the Republic of Mari El for 2018. [Electronic resource]; <https://tarif-24.ru/russia/electro/2018/456-tarify-na-elektroenergiyu-dlya-respubliki-marij-el-s-1-iyulya-2018-goda.html>.

9. On the electric energy prices (tariffs) (capacity) establishment supplied to the population and equated consuming categories in the Chuvash Republic for the year 2018. / Resolution No 118-24/э of 12.12.2017 of the State Service of the Chuvash Republic on Competition policy and tariffs. [Electronic resource]; <http://tarif.cap.ru/usercontent/tarif/sitemap//12.pdf>.

10. On establishment of the electric energy prices (tariffs) for population, living in Nizhniy Novgorod and city settlements of the Nizhniy Novgorod region in the houses equipped with gas ovens. / The Decision of the Nizhniy Novgorod Regional Service for tariffs No 67/1 of 20.12.2017. [Electronic resource]; https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie/tarify-na-elektroenergiju/nizhegorodskaya_oblast/40977/.

Author of the publication

Naumov Anatoliy Alekseevich – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

30 марта 2018 г.



УДК 621.313.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ф. Бурков¹, В.Н. Юрин², В.Р. Аветисян³

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

²Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

³Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,
г. Владивосток, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3927-563>, burkov.22@mail.ru

Резюме: Современное общество неразрывно связано с использованием электрической энергии во многих областях его жизни и деятельности. Не исключением является флот и его транспортная инфраструктура, которые оснащены электрическим оборудованием различной степени сложности. В настоящее время сотни тысяч торговых, рыбопромысловых, пассажирских и других категорий судов находятся в рабочем состоянии и выполняют свои функции по назначению. Техническое совершенство их производственных механизмов и осуществляемых ими технологических процессов в значительной степени определяется совершенством соответствующего привода и степенью его автоматизации. Преимущества электрической энергии, создание достаточно совершенных электромеханических преобразователей и развитие систем управления привели к активному внедрению автоматизированных электроприводов, основной составной частью которых являются электродвигатели. В статье представлены некоторые результаты исследований по широко используемым трехфазным асинхронным двигателям, выполненных с целью повышения их энергетической эффективности.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, однофазный режим работы.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100

Для цитирования: Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 92-100. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100.

STUDIES OF POSSIBILITIES OF ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCRONOUS MOTORS IMPROVEMENT

A.F. Burkov¹, V.N. Yurin², V.R. Avetisyan³

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

²Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

³Pacific higher naval school named after S.O. Makarov, Vladivostok, Russia

Abstract: Modern society is inseparably linked with electrical energy utilization in many areas of life and activities. Fleet and its transport infrastructure equipped with an electric equipment of various degree of complexity is not an exception. Currently, hundreds of thousands of commercial, fishing, passenger and other ships are operational and perform their functions. Technical perfection of their production mechanisms and technological processes being implemented are largely determined by the perfection of the actuator and degree of automation. The advantages of electrical energy, creation of advanced enough electromechanical converters and the development of control systems has led to the introduction of automated electric drives, the main part of which are electric motors. The article presents some results of the performed researches on widely used three-phase asynchronous motors, with the aim of improving their energy efficiency.

Keywords: induction motor, power factor, efficiency, single phase mode of work.

For citation: A.F. Burkov, V.N. Yurin, V.R. Avetisyan Studies of possibilities of energy efficiency of asynchronous motors improvement // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 92-100. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-92-100.

Введение

Поиски резервов экономии топливно-энергетических ресурсов исследуются во всех звеньях энергетического цикла: от добычи топливного сырья до использования энергии, включая электрическую [1, 2, 3].

Резерв экономии электроэнергии [4] в свете решения этих задач представляется в разработке и внедрении способов естественного повышения коэффициента мощности отдельных ее потребителей. Поскольку основными потребителями электроэнергии на флоте и береговых предприятиях являются электроприводы, то существенное влияние на энергетическую эффективность могут оказать разработанные и реализованные научно-технические мероприятия, направленные на повышение энергетических показателей: коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и коэффициента полезного действия (КПД) широко используемых асинхронных электродвигателей (ЭД) [5].

Характерной особенностью эксплуатационных режимов работы многих асинхронных ЭД является изменение в широком диапазоне нагрузок (моментов сопротивления) на валах.

1. Методика и материалы

Организованные и проведенные исследования направлены на определение некоторых закономерностей изменения коэффициентов $\cos \varphi$ и КПД трехфазных асинхронных ЭД и целесообразности использования асинхронных ЭД при однофазных режимах их работы при изменении моментов сопротивления на валах.

Асинхронные ЭД функционируют, как правило, в квазисимметричных режимах, причины которых носят разнообразный характер [6].

У симметричных ЭД такие режимы возникают, например, при неравномерном распределении нагрузок между фазами трехфазной электроэнергетической системы [7].

При аналитических исследованиях несимметричных режимов широко используется метод симметричных составляющих. Система несимметричных первичных напряжений ($\dot{U}_{SA}, \dot{U}_{SB}, \dot{U}_{SC}$) может быть представлена как сумма составляющих прямой последовательности ($\dot{U}_{спрA}, \dot{U}_{спрB}, \dot{U}_{спрC}$) и обратной последовательности ($\dot{U}_{sobA}, \dot{U}_{sobB}, \dot{U}_{sobC}$).

Составляющие напряжения статора прямой и обратной последовательностей для фазы А, например, имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{спр}A} &= \dot{U}_{\text{спр}} = \left(\dot{U}_{sA} + \dot{U}_{sB}\underline{a} + \dot{U}_{sC}\underline{a}^2 \right) / 3; \\ \dot{U}_{\text{соб}A} &= \dot{U}_{\text{соб}} = \left(\dot{U}_{sA} + \dot{U}_{sB}\underline{a}^2 + \dot{U}_{sC}\underline{a} \right) / 3. \end{aligned} \quad (1)$$

В выражении (1) $\underline{a}$, $\underline{a}^2$ – единичные комплексы, которые имеют следующий вид:

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}. \quad (2)$$

Составляющие тока фазы статора прямой и обратной последовательностей, с учетом схемы замещения асинхронного ЭД [8], выражаются аналитическими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{\text{спр}} &= \frac{\dot{U}_{\text{спр}}}{(R_s + jX_{s\sigma}) + (Z_m^{-1} + Z_{\text{гпр}}^{-1})^{-1}}; \\ \dot{I}_{\text{соб}} &= \frac{\dot{U}_{\text{соб}}}{(R_s + jX_{s\sigma}) + (Z_m^{-1} + Z_{\text{роб}}^{-1})^{-1}}. \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где R_s , $X_{s\sigma}$ – активное и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора ЭД соответственно; Z_m – комплексное сопротивление контура намагничивания; $Z_{\text{гпр}}$, $Z_{\text{роб}}$ – составляющие сопротивления эквивалентного неподвижного ротора для токов прямой и обратной последовательностей соответственно.

Составляющие $Z_{\text{гпр}}$ и $Z_{\text{роб}}$ в выражении (3) определяются как

$$Z_{\text{гпр}} = \frac{R'_r}{s} + jX'_{r\sigma}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{роб}} = \frac{R'_r}{2-s} + jX'_{r\sigma}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) s – скольжение двигателя.

Частота токов прямой последовательности $f_{\text{гпр}}$ в роторных цепях асинхронных ЭД определяется как

$$f_{\text{гпр}} = f_s \left(\frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} \right) = f_s s. \quad (6)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_s$ – угловая скорость вращения электромагнитного поля статора ЭД, f_s – частота тока статора).

Частота токов роторов обратной последовательности $f_{\text{роб}}$, выражаемая зависимостью

$$f_{\text{роб}} = (2-s) f_s, \quad (7)$$

значительно больше частоты токов ротора прямой последовательности $f_{\text{гпр}}$, определяемой по формуле (6). Эффект вытеснения токов обратной последовательности значительно больше, чем токов прямой последовательности.

С учетом схемы замещения фазные токи статора асинхронного ЭД могут быть представлены как

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{sA} &= \dot{I}_{\text{спр}} + \dot{I}_{\text{соб}}; \\ \dot{I}_{sB} &= \dot{I}_{\text{спр}}\underline{a}^2 + \dot{I}_{\text{соб}}\underline{a}; \\ \dot{I}_{sC} &= \dot{I}_{\text{спр}}\underline{a} + \dot{I}_{\text{соб}}\underline{a}^2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

При искажении напряжений статора двигателя, например, на 4 % ($U_{\text{собр}}/U_{\text{спр}} = 0,04$) искажение тока статора составляет 20 % ($I_{\text{собр}}/I_{\text{спр}} = 0,20$). При этом в одной из фаз ток в относительных единицах может составлять 1,2, а потери – 1,44 [8].

Вращающий момент M трехфазного ЭД при искажениях симметрии напряжений статора выражается как

$$M = M_{\text{пр}} + M_{\text{об}}, \quad (9)$$

где $M_{\text{пр}}$, $M_{\text{об}}$ – составляющие момента прямой и обратной последовательностей соответственно.

Составляющая вращающего момента асинхронного ЭД прямой последовательности $M_{\text{пр}}$ определяется из выражения

$$M_{\text{пр}} = \frac{m_s U_{\text{спр}}^2 R'_r}{s \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})^2 \right)}, \quad (10)$$

а обратной $M_{\text{об}}$ – из выражения

$$M_{\text{об}} = \frac{m_s U_{\text{собр}}^2 R'_r}{(2-s) \omega_0 \left(\left(R_s + \frac{R'_r}{2-s} \right)^2 + (X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})^2 \right)}. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) m_s – число фаз обмотки статора; R'_r , $X'_{r\sigma}$ – приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ротора ЭД соответственно.

Для сохранения результирующего момента M при несимметрии напряжений статора необходимо увеличение составляющей $M_{\text{пр}}$ на значение $M_{\text{об}}$, что приводит: к возрастанию скольжения s двигателя примерно в $M_{\text{пр}}/(M_{\text{пр}} - |M_{\text{об}}|)$ раз, увеличению потерь и ухудшению КПД трехфазных ЭД.

В зависимости от вида несимметрии и степени ее проявления нештатные режимы работы асинхронных ЭД можно условно объединить в четыре группы.

Режимы первой группы возникают при технологических несимметриях или незначительных разрегулировках элементов систем управления (СУ) в процессе эксплуатации. Такие эксплуатационные режимы можно отнести к квазинормальным.

Ко второй группе нештатных режимов относятся несимметричные режимы, которые возникают при значительных разрегулировках элементов или частичных отказах СУ, которые, нарушая нормальное функционирование электроприводов (ЭП), не приводят к полной потере их управляемости.

В третью группу входят специальные режимы, возникающие по причинам пробоев одного или нескольких силовых полупроводниковых приборов (СПП), при их наличии в преобразователях электрической энергии. Из-за отсутствия постоянной составляющей и четных гармоник тока перегрузки и искажения переменных незначительны.

Специальные режимы работы четвертой группы связаны с полным закрытием одного или нескольких СПП. При этом высока вероятность присутствия постоянной составляющей момента $M_{\text{пс}}$, наличие которой одновременно с двигательным режимом создает режим динамического торможения ЭД. Составляющая $M_{\text{пс}}$, как правило, вносит наибольшие искажения в механические характеристики асинхронных ЭД, так как ее значения прямо пропорциональны значениям постоянной составляющей тока, которая ограничена только активным сопротивлением обмоток двигателя. Более подробная характеристика таких режимов приведена в работе [9].

Работа трехфазных асинхронных ЭД в однофазных режимах представляет собой частный случай специальных режимов четвертой группы.

2. Результаты и обсуждение

В соответствии с поставленными задачами выполнены исследования несимметричных (однофазных) режимов работы трехфазного асинхронного ЭД типа «АО2-41-4» с целью определения возможностей повышения его энергетических показателей в области нагрузок, меньших номинальных.

Известно, что мощность трехфазных асинхронных ЭД в режиме однофазного питания при использовании различных схемных решений и дополнительных устройств может достигать 60 % от его номинальной мощности трехфазного режима. Трехфазным ЭД при однофазном питании присущи основные недостатки однофазных двигателей: отсутствие пускового момента; пониженное использование активных материалов; меньший, по сравнению с трехфазным режимом, КПД. Однако при работе трехфазных ЭД с коэффициентом загрузки k_3 , меньшим 0,5, его перевод в однофазный режим в ряде случаев может оказаться целесообразным. К особенностям однофазных режимов работы трехфазных двигателей относится повышение коэффициента $\cos \varphi$ в области малых нагрузок при примерном равенстве КПД трехфазного и однофазного режимов.

На основании полученных результатов исследований построены зависимости энергетических показателей асинхронного ЭД в трехфазном ($\cos \varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$) и однофазном ($\cos \varphi_1 = f(P_2)$, $\eta_1 = f(P_2)$) режимах работы (рис. 1).

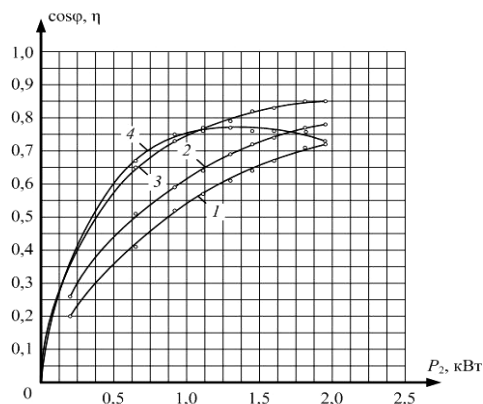


Рис. 1. Зависимости энергетических показателей ЭД типа «АО2-41-4»:
1 — $\cos \varphi = f(P_2)$; 2 — $\cos \varphi_1 = f(P_2)$; 3 — $\eta = f(P_2)$; 4 — $\eta_1 = f(P_2)$

При работе трехфазных асинхронных ЭД в однофазных режимах их энергетические показатели (характеристики) можно улучшить за счет подключения к фазным обмоткам статора конденсаторов.

Зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ двигателя «АО2-41-4», построенные по результатам исследований при работе в трехфазном и однофазных режимах с подключенными в схему обмоток статора конденсаторами различной емкости, показаны на рис. 2.

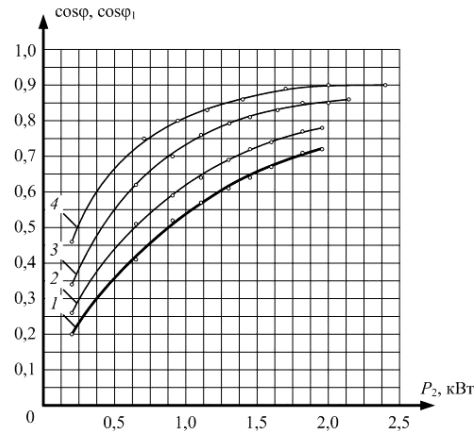


Рис. 2. Зависимости $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ исследуемого двигателя:

1 – трехфазного режима работы ($U_C = 380 \text{ В}$); 2 – однофазного режима ($U_C = 380 \text{ В}$), $C = 0 \text{ мкФ}$;

3 – $C = 16 \text{ мкФ}$; 4 – $C = 24 \text{ мкФ}$

На рис. 3 показаны зависимости КПД от мощности P_2 двигателя «АО2-41-4», построенные по результатам исследований при трехфазном и однофазных режимах работы с подключенными в схему обмоток статора конденсаторами.

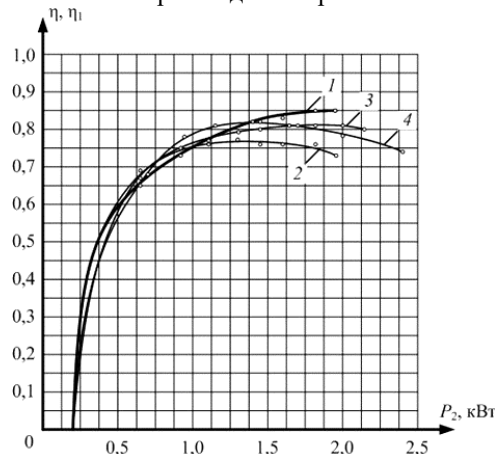


Рис. 3. Зависимости $\eta = f(P_2)$ и $\eta_1 = f(P_2)$ ЭД

(Обозначения – как на рис. 2)

Исходя из изложенного, с точки зрения энергетических показателей в области малых нагрузок использование трехфазных ЭД в однофазных режимах при определенных условиях более экономично, что подтверждено проведенными исследованиями.

При подключении к фазным обмоткам статора конденсаторов коэффициент $\cos \varphi_1$ ЭД повышается как за счет улучшения характеристик двигателей, так и за счет действия конденсаторов, являющихся емкостными элементами. При нагрузке на исследуемый ЭД, соответствующей, например, $P_2=1,12 \text{ кВт}$ в трехфазном режиме, потребляемая мощность двигателя $P=1,46 \text{ кВт}$, а коэффициент $\cos \varphi$ составляет 0,57. При этом $\text{tg } \varphi=1,43$, а реактивная мощность Q имеет значение 2,09 кВАр. Соответственно в однофазном режиме работы при $P_2=1,12 \text{ кВт}$ и $P=1,46 \text{ кВт}$ $\cos \varphi_1$ увеличивается до 0,64 (на 12,3 %), а $\text{tg } \varphi=1,19$ и $Q=1,74 \text{ кВАр}$. Для той же нагрузки, соответствующей $P_2=1,12 \text{ кВт}$, при подключении конденсаторов суммарной емкостью C , равной 16 мкФ, коэффициент $\cos \varphi_1$ увеличивается

до 0,76 (на 33,3 %). В этом случае $\tan \varphi = 0,90$ и $Q = 1,31$ кВАр. При подключении в однофазном режиме к обмоткам статора исследуемого ЭД конденсаторов суммарной емкостью 24 мкФ $\cos \varphi_1$ увеличивается до 0,83 (на 45,6 %), а $\tan \varphi = 0,67$ и $Q = 0,95$ кВАр.

Значения коэффициента η_1 в этих случаях практически остаются неизменными в диапазоне нагрузок, составляющем $(0 \dots 0,3)P_{2н}$.

У исследуемого двигателя, имеющего $\cos \varphi_n$ 0,85 при $P_{2н} = 4,0$ кВт, в случаях однофазных режимов работы коэффициент $\cos \varphi_1$ достигает значений: 0,78 при $P_2 = 1,96$ кВт $(0,49P_{2н})$ и $C = 0$; 0,86 – при $P_2 = 2,14$ кВт $(0,54P_{2н})$ и $C = 16$ мкФ; 0,90 – при $P_2 = 2,40$ кВт $(0,60P_{2н})$ и $C = 24$ мкФ.

Номинальное значение КПД η_n у исследуемого двигателя составляет 0,86 при $P_{2н} = 4,0$ кВт. При однофазных режимах работы коэффициент η_1 достигает значений: 0,77 при $P_2 = (1,12 \dots 1,30)$ кВт $((0,28 \dots 0,33)P_{2н})$ и $C = 0$; 0,81 – при $P_2 = (1,64 \dots 2,00)$ кВт $((0,41 \dots 0,50)P_{2н})$ и $C = 16$ мкФ; 0,82 – при $P_2 = 1,40$ кВт $(0,35P_{2н})$ и $C = 24$ мкФ.

При однофазных режимах работы наблюдается увеличение фазного тока у исследуемого ЭД.

На рис. 4 показаны полученные в результате исследований осциллограммы переходного и установившегося режимов работы двигателя.

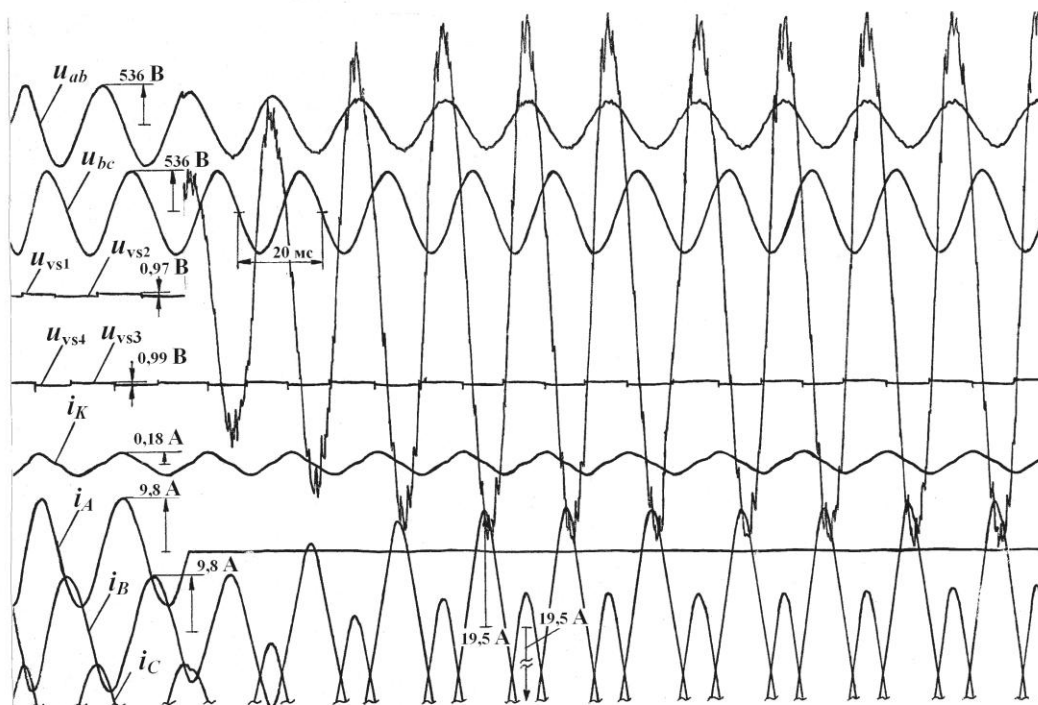


Рис. 4. Осциллограммы переходного и установившегося режима работы исследуемого асинхронного ЭД при однофазном режиме работы

В случаях возникновения однофазных режимов при работе двигателя в предшествующих трехфазных режимах амплитудный фазный ток увеличивается практически в два раза $(1,99I_{ф})$.

Результаты выполненных исследований несимметричных режимов работы ЭП с асинхронными двигателями, включая однофазные, достаточно подробно приведены в работе [10].

Заключение

По результатам исследований однофазных режимов работы трехфазных ЭД отмечена тенденция повышения коэффициента $\cos \varphi$ с увеличением подключаемых к обмоткам статоров емкостей при незначительном изменении КПД в области нагрузок, составляющих до 40 % от номинальных.

В случаях однофазных режимов, как и трехфазных, условия для достижения наибольших значений коэффициента мощности и КПД в функциях нагрузок различны.

При переключении трехфазных ЭД в однофазные режимы наблюдается незначительное изменение угловой скорости ω_r их роторов.

Полученные результаты дают основание для вывода о том, что с точки зрения энергетических показателей использование трехфазных ЭД в однофазных режимах при определенных условиях более экономично.

Очевидно, что применение однофазных режимов будет тем эффективнее, чем большую часть времени ЭД будет работать в областях малых нагрузок.

Литература

1. Ключников А.Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения // Промышленная энергетика. 2001. № 4. С. 12–17.
2. Романов А.А., Земцов А.С. Необходимость технического перевооружения электроэнергетики России // Промышленная энергетика. 2002. № 3. С. 2–5.
3. Дьяков А.Ф. Состояние и перспективы развития нетрадиционной энергетики в России // Известия Академии наук. Энергетика. 2000. №4. С. 13–29.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : Стандартинформ, 2014. 20 с.
5. Сердешнов А.П. Ремонт электрооборудования. В 2 ч. Ч. 1. Ремонт электрических машин. 2 изд. Минск : ИВЦ Минфина, 2008. 293 с.
6. Бурков А.Ф. Надежность судовых электроприводов. Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. 204 с.
7. Цицикян Г.Н. Качество электроэнергии в автономных системах. СПб.:Крыловский государственный научный центр, 2014. 102 с.
8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2 т. Т. 1. М. : ИД МЭИ, 2006. 650 с.
9. Туганов М.С. Судовой бесконтактный электропривод. Л. : Судостроение, 1978. 288 с.
10. Бурков А.Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов. Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 417 с.

Авторы публикации

Бурков Алексей Федорович – д-р техн. наук, профессор Дальневосточного федерального университета. E-mail: burkov.22@mail.ru.

Юрин Валерий Николаевич – доцент Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского. E-mail: yurinvn@yandex.ru.

Аветисян Вагаршак Радиевич – адъюнкт Тихоокеанского высшего военно-морского училища имени С.О. Макарова. E-mail: merin1309@mail.ru.

References

1. Kljuchnikov A.D. Predposylki radikal'nogo povysheniya `effektivnosti rabot v oblasti `energoberezheniya // Promyshlennaja `energetika. 2001. № 4. P.12–17.

2. Romanov A.A., Zemtsov A.S. Neobhodimost' tehnikeskogo perevooruzheniya `elektro`energetiki Rossii // Promyshlennaya `energetika. 2002. № 3. P.2–5.
3. D'jakov A.F. Sostojanie i perspektivy razvitija netraditsionnoj `energetiki v Rossii // Izvestija Akademii nauk. `Energetika. 2000. № 4. P.13–29.
4. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elek-tricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. M. : Standartinform, 2014. 20 p.
5. Serdeshnov A.P. Remont `elektrooborudovaniya. V 2 ch. Ch. 1. Remont `elektricheskikh mashin. 2-e izd. Minsk : IVTs Minfina, 2008. 293 p.
6. Burkov A.F. Nadezhnost' sudovyh `elektroprivodov. Vladivostok : Dal'nevost. federal. un-t, 2014. 204 p.
7. Tsitsikjan G.N. Kachestvo `elektro`energii v avtonomnyh sistemah. SPb.:Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj tsentr, 2014. 102 p.
8. Ivanov-Smolenskij A.V. `Elektricheskie mashiny. V 2 t. T. 1. M. : ID M`EI, 2006. 650 p.
9. Tuganov M.S. Sudovoj beskontaktnyj `elektroprivod. L. : Sudostroenie, 1978. 288 p.
10. Burkov A.F. Povyshenie `effektivnosti tehnikeskoy `ekspluatatsii sudovyh `elektroprivodov. – Vladivostok : Mor. gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 417 p.

Authors of the publication

Aleksey F. Burkov – Doc. Sci. (Techn.), professor, Far Eastern Federal University. E-mail: burkov.22@mail.ru.

Valeriy N. Yurin – Assoc, Maritime state University named after adm. G.I. Nevelskoy E-mail: yurinvn@yandex.ru.

Vagarshak R. Avetisyan– adjunct of Pacific higher naval school named after S.O. Makarov E-mail: merin1309@mail.ru.

Поступила в редакцию

16 апреля 2018 г.



АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНКУБАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

А.А.Варенов, В.П. Зенцов, Н.А. Малёв

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: Исследованы тепловые процессы в инкубационной камере, разработаны рекомендации по управлению температурой в этой прецизионной системе на основе синтеза корректирующих устройств, позволяющих повысить качество её функционирования.

Ключевые слова: функциональная схема, передаточная функция, процесс регулирования, моделирование линейной непрерывной системы.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-101-108

Для цитирования: А.А.Варенов, В.П. Зенцов, Н.А. Малёв Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры в инкубационной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 101-108. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-101-108.

DYNAMIC PROCESSES ANALYSIS IN THE TEMPERATURES STABILIZATION SYSTEM, IN THE INCUBATION CHAMBER

A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malyov

Kazan State Power Engineering University

Abstract: Thermal processes in incubation chamber were investigated. From the investigations, the recommendations were developed for controlling the temperature in this precision system based on the synthesis of correcting devices, allowing one to improve its functional quality.

Keywords: Functional scheme, transfer function, process regulation, modeling of linear continuous system.

For citation: A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malyov Dynamic processes analysis in the temperatures stabilization system, in the incubation chamber // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 101-108. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-101-108.

Поддержание постоянной температуры в замкнутом объеме является важной задачей во многих производственных процессах. Теплообмен при этом характеризуется значительной инерционностью, т.к. для мгновенного изменения температуры необходимо затрачивать бесконечно большую энергию [1–3]. Распространенным источником тепловой энергии является электронагреватель, преобразующий электрическую энергию в тепловую.

На рис. 1 показана функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) температуры в инкубационной камере (ИК) [6].

Исследуемая САР относится к разряду прецизионных систем. Динамические процессы в этой системе описываются уравнениями:

$$\text{сравнивающее устройство } \Delta U(t) = U_0 - E(t);$$

$$\text{усилительное устройство } U(t) = K_y \Delta U(t);$$

$$\text{тиристорный блок питания } U_{\text{тр}}(t) = K_{\text{тр}} U_y(t);$$

$$\text{нагревательный элемент } T_{\text{н}} \dot{\Theta}_{\text{н}}(t) + \Theta_{\text{н}}(t) = K_{\text{н}} P_{\text{н}}(t) + \Theta_{\text{к}}(t);$$

$$\text{инкубационная камера } T_{\text{к}} \dot{\Theta}_{\text{к}}(t) + \Theta_{\text{к}}(t) = K_{\text{н}} \Theta_{\text{н}}(t) + K_0 \Theta_0(t);$$

$$\text{термопара } T_{\text{т}} \dot{E}(t) + E(t) = K_{\text{т}} \Theta_{\text{к}}(t),$$

где $\Theta_{\text{н}}$, $\Theta_{\text{к}}$, Θ_0 – температуры нагревателя, камеры и окружающей среды соответственно;

E – эдс термопары; $P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R}$ – мощность, потребляемая нагревателем ($U_{\text{н}}$ – напряжение, прикладываемое к нагревателю, а R – его сопротивление); K_y , $K_{\text{тр}}$, $K_{\text{н}} = \frac{1}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}$,

$K_{\text{к}} = \frac{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $K_0 = \frac{K_{\text{то}} S_0}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $K_{\text{т}}$ – коэффициенты передачи усилителя, блока управления тиристорами, нагревателя, инкубационной камеры по управляющему воздействию $U_{\text{н}}$, инкубационной камеры по возмущающему воздействию Θ_0 и термопары

соответственно; $T_{\text{н}} = \frac{C_{\text{н}} m_{\text{н}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}$, $T_{\text{к}} = \frac{C_{\text{к}} m_{\text{к}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $T_{\text{т}} = \frac{C_{\text{т}} m_{\text{т}}}{K_{\text{тт}} S_{\text{т}}}$ – постоянные времени

нагревателя, камеры и термопары соответственно; $C_{\text{н}}$, $C_{\text{к}}$, $C_{\text{т}}$ – удельные теплоемкости; $m_{\text{н}}$, $m_{\text{к}}$, $m_{\text{т}}$ – массы; $K_{\text{тн}}$, $K_{\text{то}}$, $K_{\text{тт}}$ – коэффициенты теплоотдачи нагревателя, внутренних стен камеры и термопары; $S_{\text{н}}$, S_0 , $S_{\text{т}}$ – площади поверхности этих элементов.

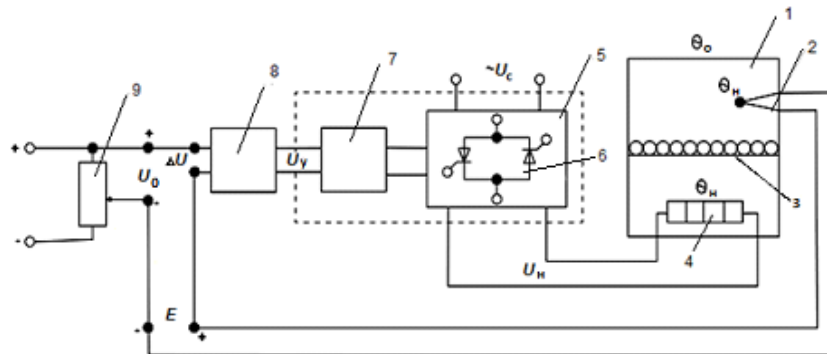


Рис. 1. Функциональная схема САР температуры в инкубационной камере:

- 1 – ИК; 2 – термопара; 3 – лоток для яиц; 4 – нагреватель; 5, 6 – тиристорный блок питания;
7 – блок управления тиристорами; 8 – усилитель; 9 – задающее устройство

После записи приведенных уравнений в изображении по Лапласу с использованием источников [3, 4, 5, 8] запишем передаточные функции элементов САР:

$$W_y(s) = \frac{U_y(s)}{\Delta U(s)} = K_y - \text{усилитель};$$

$$W_{\text{тр}}(S) = \frac{U_{\text{н}}(S)}{U_{\text{у}}(S)} = K_{\text{тр}} - \text{блок управления тиристорами;}$$

$$W_{\text{ну}}(S) = \frac{\Theta_{\text{н}}(S)}{P_{\text{н}}(S)} = \frac{K_{\text{н}}}{T_{\text{н}}S + 1} - \text{нагреватель по управлению;}$$

$$W_{\text{нв}}(S) = \frac{\Theta_{\text{н}}(S)}{\Theta_{\text{к}}(S)} = \frac{1}{T_{\text{н}}S + 1} - \text{нагреватель по возмущению;}$$

$$W_{\text{т}}(S) = \frac{E(S)}{\Theta_{\text{к}}(S)} = \frac{K_{\text{т}}}{T_{\text{т}}S + 1} - \text{термопара;}$$

$$W_{\text{ку}}(S) = \frac{\Theta_{\text{к}}(S)}{\Theta_{\text{н}}(S)} = \frac{K_{\text{к}}}{T_{\text{к}}S + 1} - \text{ИК по управлению;}$$

$$W_{\text{кв}}(S) = \frac{\Theta_{\text{к}}(S)}{\Theta_{\text{о}}(S)} = \frac{K_{\text{о}}}{T_{\text{к}}S + 1} - \text{ИК по возмущению.}$$

Мощность нагревателя $P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R}$ является нелинейной функцией напряжения.

Учитывая, что изменения напряжения $U_{\text{н}}$ в процессе регулирования небольшие, проведена линеаризация этой функции разложением в ряд:

$$P_{\text{н}}(U_{\text{н}}) = P_{\text{н}}(U_{\text{н0}}) + \frac{1}{1!} \left(\frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \right) (U_{\text{н}} - U_{\text{н0}}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2P_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}^2} \right) (U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})^2 + \dots,$$

откуда

$$P_{\text{н}}(U_{\text{н}}) - P_{\text{н}}(U_{\text{н0}}) = \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \Delta U_{\text{н}} \text{ или } \Delta P_{\text{н}} = \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \Delta U_{\text{н}}.$$

$$\text{Учитывая } \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} = \frac{d \left(\frac{U_{\text{н}}^2}{R} \right)}{dU_{\text{н}}} = \frac{2U_{\text{н}}}{R}, \quad \text{при } U_{\text{н}} = U_{\text{н0}} \quad \text{получим}$$

$$\frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R} = K_p.$$

Таким образом, $\Delta P_{\text{н}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R} \Delta U_{\text{н}} = K_p \Delta U_{\text{н}}$ является уравнением в отклонениях

переменных, в котором удержаны только составляющие первого порядка малости и опущены составляющие более высокого порядка, что является допустимым для инженерных расчетов. Передаточные функции элементов САР позволяют построить структурную схему динамической модели (ССДМ) [2], показанную на рис. 2. Свернув внутренний замкнутый контур с положительной обратной связью [9], получим передаточную функцию разомкнутой некоррелированной системы:

$$W(S) = \frac{K_{\text{у}} K_{\text{тр}} K_{\text{р}} K_{\text{н}} (T_{\text{н}}S + 1) K_{\text{к}} K_{\text{т}}}{(T_{\text{н}}S + 1) [(T_{\text{к}}S + 1)(T_{\text{н}}S + 1) - K_{\text{к}}]} =$$

$$\frac{K}{[(T_{\text{к}}S + 1)(T_{\text{н}}S + 1) - K_{\text{к}}]} = \frac{B(S)}{D(S)},$$

где $K = K_{\text{у}} K_{\text{тр}} K_{\text{р}} K_{\text{н}} K_{\text{к}} K_{\text{т}}$ – коэффициент передачи разомкнутой некоррелированной системы.

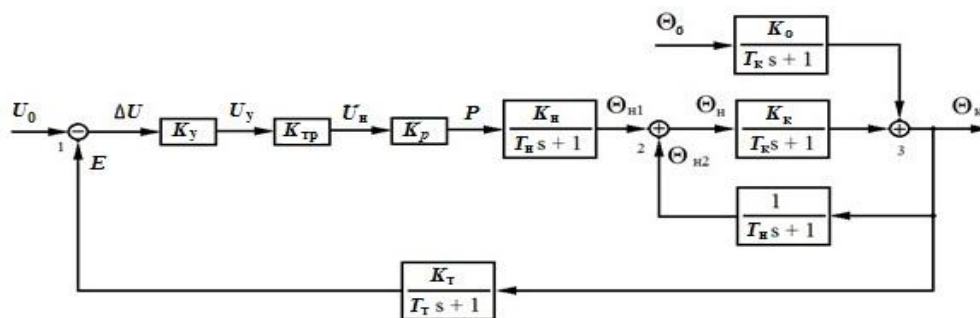


Рис. 2. Структурная схема динамической системы модели
Характеристический многочлен замкнутой системы $A(S) = B(S) + D(S)$ или

$$A(S) = T_n T_k T_t S^3 + (T_n T_k + T_n T_t + T_k T_t) S^2 + (T_n + T_k - T_t T_k) S + (1 + K) = a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0,$$

где

$$\begin{aligned} a_3 &= T_n T_k T_t > 0, \\ a_2 &= (T_n T_k + T_n T_t + T_k T_t) > 0 \\ a_1 &= T_n + T_k - T_t T_k > 0 \\ a_0 &= 1 + K > 0. \end{aligned}$$

Оценка устойчивости САР по критерию Гурвица ($\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$) для физически реализуемых параметров показывает, что система является устойчивой и обладает большими запасами устойчивости, что подтверждается графиками логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ), показанными на рис. 3. Из полученных ЛЧХ следует, что запас устойчивости по амплитуде составляет 95,3 дБ, тогда как запас устойчивости по фазе сложно оценить, в силу сравнительно небольшого значения общего коэффициента передачи системы на порядок меньшего единицы и, как следствие, отсутствия точки пересечения ЛАЧХ с осью 0 дБ.

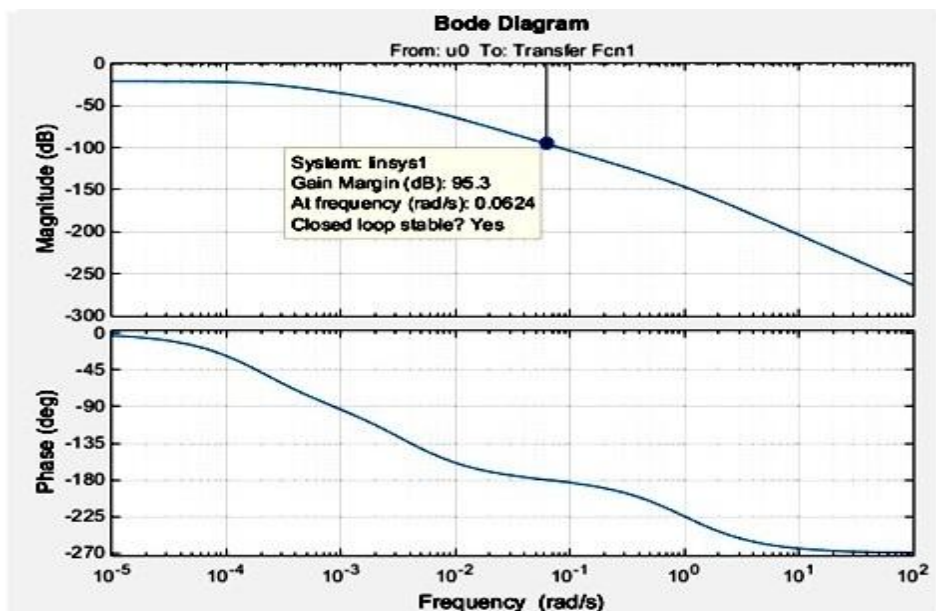


Рис. 3. ЛЧХ САР температуры

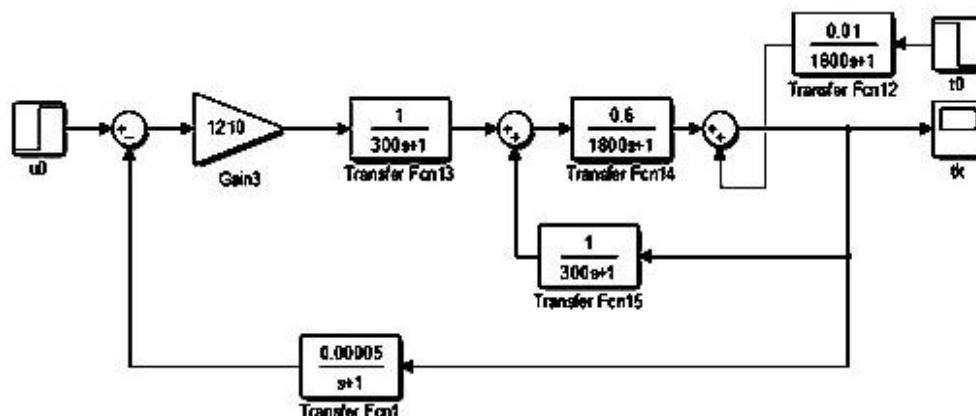


Рис. 4. Схема моделирования САР температуры в среде *MatlabSimulink*

В связи с этим научная задача, решаемая в работе, сводится к анализу временных характеристик системы регулирования температуры в инкубационной камере с последующей выработкой рекомендаций по применению соответствующих способов коррекции, позволяющих улучшить показатели качества переходных процессов.

Результат моделирования некоррелированной системы в соответствии со схемой моделирования в среде *MatLabSimulink* [7] (рис. 4) при заданных параметрах показан на рис. 5. Из него следует, что температура в ИК достигает своего установившегося значения $38,2^{\circ}\text{C}$ за $3 \cdot 10^4$ с.

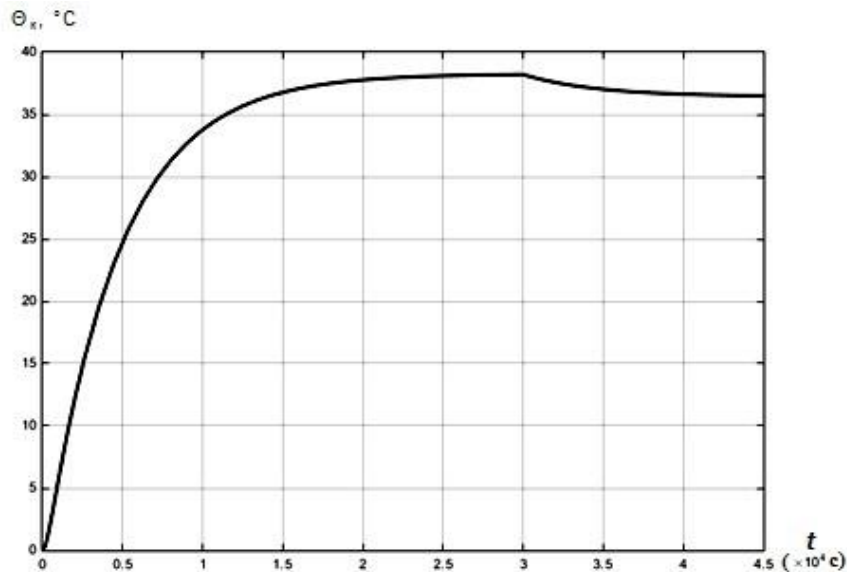


Рис. 5. Переходная характеристика системы по задающему воздействию

Из графика видно, что в системе имеет место ошибка по возмущению и при температуре окружающей среды $\Theta_0 = -40^{\circ}\text{C}$ абсолютное значение ошибки составляет $1,7^{\circ}\text{C}$. Кроме того, САР температуры обладает существенной инерционностью и малым быстродействием, что также является весомым недостатком некоррелированной системы.

Моделирование нелинейной САР температуры в инкубаторе показало, что графики переходных процессов не имеют принципиальных отличий по сравнению с

линеаризованной системой, что говорит о корректности принятого выше допущения. На рис. 6 показана зависимость мощности нагревателя от времени.

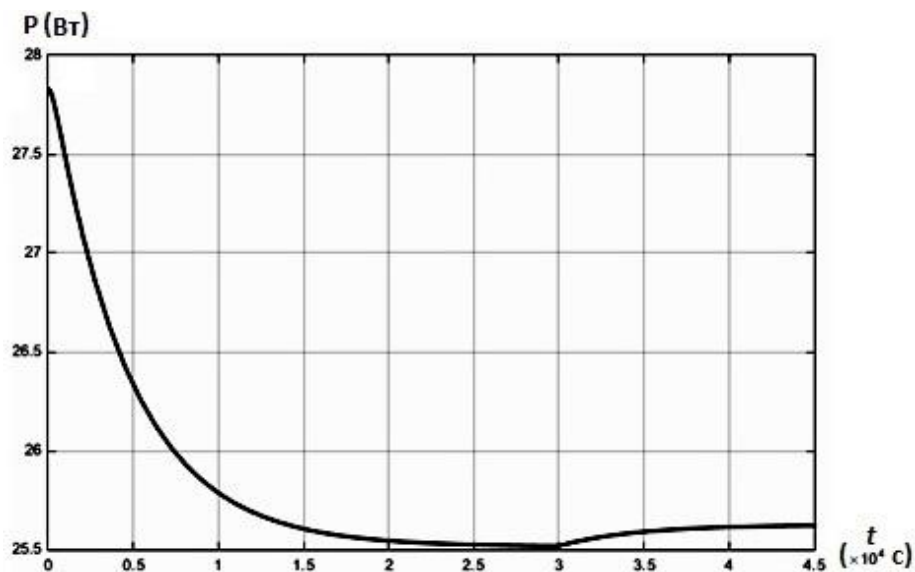


Рис.6. График зависимости мощности нагревателя от времени

Из графика следует, что в момент запуска системы потребляемая на нагрев мощность составляет 27,83 Вт, постепенно устанавливаясь к значению 25,5 Вт. При воздействии возмущения в виде изменения температуры окружающей среды наблюдается некоторое увеличение мощности до величины 25,62 Вт.

Таким образом, исследуемая система регулирования температуры в инкубаторе является чувствительной к возмущающим воздействиям, а время достижения установившегося состояния составляет около 8 часов. С учетом перечисленных особенностей некоррелированной САР возникает задача синтеза коррелирующих устройств, позволяющих повысить качество функционирования системы.

Литература

1. Бахмуров А.В., Гильфанов К.Х., Гольбрайх Л.Я. Совершенствование алгоритма управления объектом теплоэнергетики на основе интеллектуального контроллера // Энергетика Татарстана. 2013. С.42–46.
2. Варенов А.А., Якимов Н.Д., Ерашова Ю.Н. Инженерная модель теплового режима в индивидуальном доме // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 3-4. С.22–28.
3. Варенов А.А. Структура и динамическая модель электропривода с импульсным управлением для беспилотного летательного аппарата мониторинга энергообъектов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С.78–83.
4. Варенов А.А., Малев Н.А. Гибридный регулятор напряжения релейного типа в системе бесперебойного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 7-8. С.47–53.
5. Варенов А.А., Малев Н.А., Погодицкий О.В. Аналоговый и цифровой регуляторы автоматической системы стабилизации частоты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5-6. С. 120–129.
6. Математическое моделирование систем автоматического регулирования: Практикум по автоматике / Под ред. Карташова Б.А. М.: “Колосс”, 2006.
7. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. ТАУ в примерах и задачах с решениями в MATLAB. Изд. Лань, 2017. 464с.

8. WONGH.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166.WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R.,Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation..Butterwrth-Heinemann.

10. Mohd Badli Ramli, Mohd Faiz, Mohd Zin. Egg Hatching Incubator Using Conveyor Rotation System// www.sciencedirect.com URL:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015/07/091.

Авторы публикации:

Варенов Александр Андреевич – профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: luna199645@mail.ru.

Зенцов Василий Павлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: vpzen@yandex.ru.

Малёв Николай Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: maleev@mail.ru.

References

1. Bakhmurov A.V., Gilfanov K.H., Golbraikh L.Ya. Perfection of the algorithm of control of the object of heat power engineering on the basis of an intelligent controller. Power engineering of Tatarstan. 2013. P.42–46.

2. Varenov A.A, Yakimov N.D, Yerashova Yu.N. Engineering model of the thermal regime in the individual house. //Известия HIGH SCHOOL. Problems of energy. 2016. № 3-4. P.22–28.

3. Varenov A.A. Structure and dynamic model of an electric drive with pulse control for an unmanned aircraft for monitoring energy facilities.// Известия HIGH SCHOOL. Problems of energy, 2013. № 5-6. P.78–83.

4. Varenov A.A, Malev N.A. Hybrid voltage regulator of relay type in the uninterruptible power supply system // Известия HIGH SCHOOL. Problems of Power Engineering, 2013. No. 7-8. P.47–53.

5. Varenov A.A, Malev N.A, Pogoditsky O.V. Analog and digital regulators of automatic frequency stabilization system. //Известия HIGH SCHOOL. Problems of Power Engineering, 2014. № 5-6. P.120–129.

6. Ed. Kartashov B.A. Workshop on automation. Mathematical modeling of automatic control systems. М.: "The Colossus", 2006.

7. Gaiduk A.R, Belyaev V.E, Piavchenko T.A. TAU in examples and problems with solutions in MATLAB. Ed. Lan. 2017. 464p.

8. WONG H.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166. WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R., Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation .. Butterwrth-Heinemann.

8. WONGH.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166.WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R.,Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation..Butterwrth-Heinemann.

10. Mohd Badli Ramli, Mohd Faiz, Mohd Zin. Egg Hatching Incubator Using Conveyor Rotation System// www.sciencedirect.com URL:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015/07/091.

Authors of the publication

Alexander A. Varenov – Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Kazan State Power Engineering University (KSPU). E-mail: luna199645@mail.ru.

Vasiliy P. Zentsov – Ph.D. (physical&mathematical), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Kazan State Power Engineering University (KSPU), E-mail: vpzen@yandex.ru.

Nikolay A. Malev – Ph.D. (Techn.), Associate Professor, Instrument Making and Mechatronics Department, Kazan State Power Engineering University (KSPU), E-mail: maleev@mail.ru.

Поступила в редакцию

24 апреля 2018 г.



УРАВНЕНИЯ ПАССИВНОГО ВОСЬМИПОЛЮСНИКА С ТРЕМЯ ВХОДНЫМИ И ПЯТЬЮ ВЫХОДНЫМИ ВЫВОДАМИ

Г.А. Большанин

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0218-7334>, bolshaning@mail.ru

Резюме: Восемиполюсники различных исполнений, в том числе и восьмиполюсник с тремя входными и пятью выходными выводами, необходимы для замещения некоторых энергетических объектов. Особенно тогда, когда интерес представляют лишь входные и выходные характеристики электрической энергии. В статье представлены уравнения восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами, устанавливающие связь между этими характеристиками. Уравнения А-формы устанавливают связь между входными и выходными напряжениями и токами; уравнения В-формы устанавливают связь между выходными и входными напряжениями и токами; уравнения G-формы устанавливают связь между входным током, выходными напряжениями и выходным напряжением, выходными токами; уравнения H-формы устанавливают связь между входным напряжением, выходными токами и выходным током, выходными напряжениями; уравнения Y-формы устанавливают связь между входными и выходными токами и входными и выходными напряжениями; уравнения Z-формы устанавливают связь между входными и выходными напряжениями и входными и выходными токами. При реализации этих уравнений следует обратить внимание на различие направлений токов в каждом отдельном случае.

Ключевые слова: выводы, коэффициенты восьмиполюсника, напряжения, токи, направления, матричная запись.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-109-119

Для цитирования: Большанин Г.А. Уравнения пассивного восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 109-119. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-109-119.

EQUIVALENTS OF THE PASSIVE EIGHT-EARTH POLAR WITH THREE INPUT AND FIVE OUTPUT CONCLUSIONS

G.A. Bolshanyn

Bratsky State University, Bratsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0218-7334>, bolshaning@mail.ru

Abstract: Eight-poles of various designs, including an eight-terminal network with three input and five output terminals, are needed to replace some power objects. Especially when only the input and output characteristics of electrical energy are of interest. The paper presents the eight-terminal network equations with three input and five output terminals, establishing a connection

between these characteristics. Equations of the A-form establish a connection between the input and output voltages and currents; the B-form equations establish a connection between the output and input voltages and currents; G-form equations establish a connection between the input current, output voltages and output voltage, output currents; H-form equations establish the relationship between the input voltage, output currents and output current, output voltages; the Y-form equations establish a connection between the input and output currents and the input and output voltages; The Z-form equations establish the relationship between the input and output voltages and the input and output currents. When implementing these equations, attention should be paid to the difference in the directions of the currents in each individual case.

Keywords: conclusions, coefficients of an eight-terminal network, voltages, currents, directions, matrix recording.

For citation: G.A. Bolshanyan *Equivalents of the passive eight-earth polar with three input and five output conclusions* // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 109-119. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-109-119.

Введение

Восьмиполусником называют часть электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы с восемью выводами. Эти выводы делятся на входные и выходные. Причем их соотношение может быть самым разнообразным. Разнообразие этих соотношений обуславливает различие модификаций восьмиполусников.

Восьмиполусники – это одна из разновидностей многополусников. Идея замещения электротехнических объектов многополусниками возникла давно [1, 2]. Но до недавнего времени основное внимание уделялось теории четырехполусников. Теория многополусников рассматривалась, в основном, применительно к устройствам связи [3, 4]. Позже возможность применения теории многополусников стали рассматривать при синтезе и анализе электрических цепей [5], в силовой энергетике [6–8], в электронике [9], в системах автоматического управления промышленными технологиями [10] и даже в механике [11, 12].

Восьмиполусники могут иметь два входных и шесть выходных, три входных и пять выходных, четыре входных и четыре выходных, пять входных и три выходных, шесть входных и два выходных вывода. К входным выводам обычно подключаются внешние источники электрической энергии или устройства, являющиеся посредниками между источниками электрической энергии и восьмиполусником, а к выходным – потребители этой энергии.

Восьмиполусники делятся на активные и пассивные.

Активными называют восьмиполусники, содержащие в своем составе источник или источники электрической энергии.

Пассивными называют восьмиполусники, не содержащие в своем составе источник или источники электрической энергии.

Обычно восьмиполусник представляет собой «черный ящик», внутреннее содержание которого чаще всего неизвестно. Интерес в этом случае представляют лишь входные и выходные характеристики электрической энергии.

Методика исследования

Общий вид восьмиполусника с тремя входными и пятью выходными выводами показан на рис. 1.

Анализируемый восьмиполусник характерен двумя входными напряжениями $\dot{U}_{11}$ и $\dot{U}_{21}$, двумя входными токами $\dot{I}_{11}$ и $\dot{I}_{21}$, четырьмя выходными напряжениями $\dot{U}_{12}$, $\dot{U}_{22}$, $\dot{U}_{32}$, $\dot{U}_{42}$ и четырьмя выходными токами $\dot{I}_{12}$, $\dot{I}_{22}$, $\dot{I}_{32}$, $\dot{I}_{42}$.

Входное напряжение $\dot{U}_{11}$ определяется разностью потенциалов между входными выводами 1 и 3, а входное напряжение $\dot{U}_{21}$ – разностью потенциалов между входными выводами 2 и 3. Разность этих напряжений определяет напряжение между входными выводами 1 и 2: $\dot{U}_1 = \dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}$.

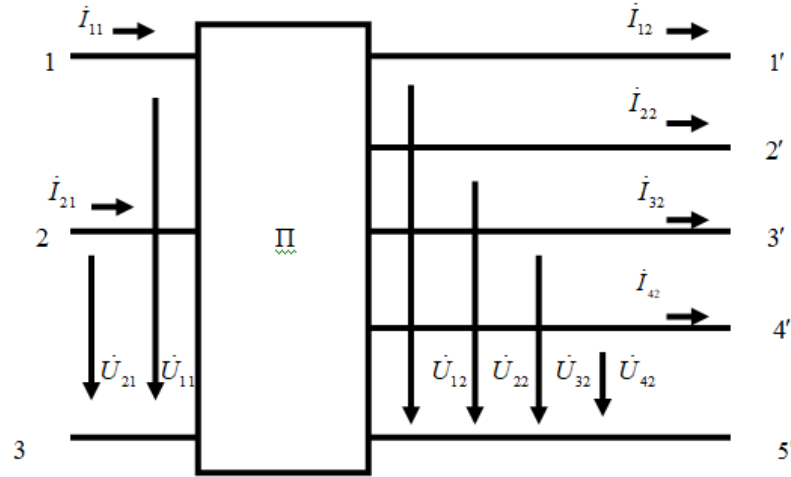


Рис. 1. Пассивный восьмиполусник с тремя входными и пятью выходными выводами

Выходное напряжение $\dot{U}_{12}$ может быть представлено разностью потенциалов между выходными выводами 1' и 5'; выходное напряжение $\dot{U}_{22}$ – разностью потенциалов между выходными выводами 2' и 5'; выходное напряжение $\dot{U}_{32}$ – разностью потенциалов между выходными выводами 3' и 5'; выходное напряжение $\dot{U}_{42}$ – разностью потенциалов между выходными выводами 4' и 5'. Разность выходных напряжений $\dot{U}_{12}$ и $\dot{U}_{22}$ определяет напряжение между выходными выводами 1' и 2': $\dot{U}_{1'2'} = \dot{U}_{12} - \dot{U}_{22}$; разность выходных напряжений $\dot{U}_{12}$ и $\dot{U}_{32}$ определяет напряжение между выходными выводами 1' и 3': $\dot{U}_{1'3'} = \dot{U}_{12} - \dot{U}_{32}$; разность выходных напряжений $\dot{U}_{12}$ и $\dot{U}_{42}$ – напряжение между выходными выводами 1' и 4': $\dot{U}_{1'4'} = \dot{U}_{12} - \dot{U}_{42}$. Разность выходных напряжений $\dot{U}_{22}$ и $\dot{U}_{32}$ определяет напряжение между выходными выводами 2' и 3': $\dot{U}_{2'3'} = \dot{U}_{22} - \dot{U}_{32}$; разность напряжений $\dot{U}_{22}$ и $\dot{U}_{42}$ – напряжение между выходными выводами 2' и 4': $\dot{U}_{2'4'} = \dot{U}_{22} - \dot{U}_{42}$. Разность выходных напряжений $\dot{U}_{32}$ и $\dot{U}_{42}$ определяет напряжение между выходными выводами 3' и 4': $\dot{U}_{3'4'} = \dot{U}_{32} - \dot{U}_{42}$.

Входной ток $\dot{I}_{11}$ имеет место во входном выводе 1, а входной ток $\dot{I}_{21}$ – во входном выводе 2. Ток во входном выводе 3 определяется суммой этих токов: $\dot{I}_{31} = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}$.

Выходной ток $\dot{I}_{12}$ может быть зарегистрирован в выходном выводе 1', ток $\dot{I}_{22}$ – в выходном выводе 2', ток $\dot{I}_{32}$ – в выходном выводе 3', ток $\dot{I}_{42}$ – в выходном выводе 4'. Ток в выходном выводе 5' определяется суммой этих токов: $\dot{I}_{52} = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{22} + \dot{I}_{32} + \dot{I}_{42}$.

Состояние восьмиполусника с тремя входными и пятью выходными выводами тоже может быть описано уравнениями различных форм: *A*-формы, *B*-формы, *G*-формы, *H*-формы, *Y*-формы и *Z*-формы. Эти уравнения могут быть составлены и использованы в инженерной практике с учетом своеобразия условно положительных направлений токов. На рис. 1 показаны условно положительные направления напряжений и токов, принимаемые при составлении уравнений *A*-формы. На рис. 2, *a* показаны условно положительные направления напряжений и токов, принимаемые при составлении уравнений *B*-формы, а на рис. 2, *б* – при составлении уравнений *G*-формы, *H*-формы, *Y*-формы и *Z*-формы.

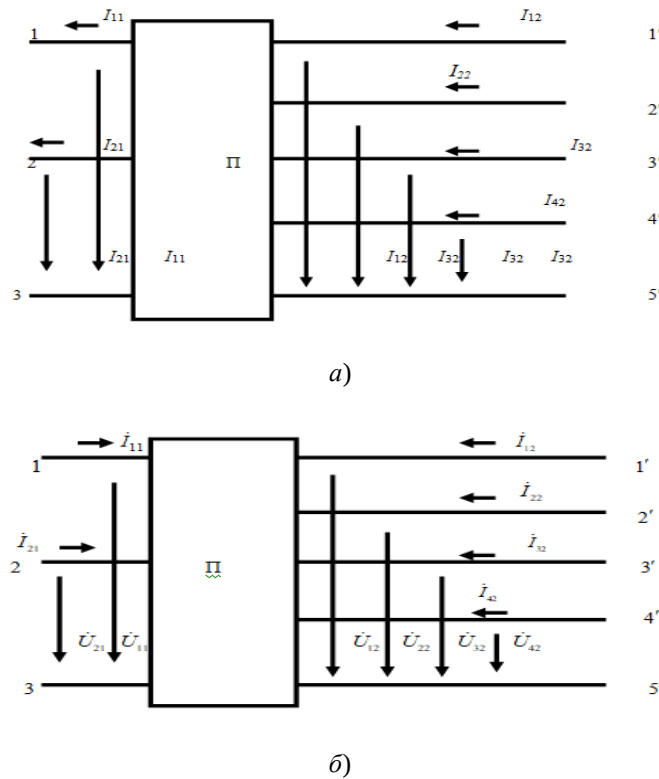


Рис. 2. Пассивные восьмиполусники с тремя входными и пятью выходными выводами

Количественную связь между входными и выходными напряжениями и токами устанавливают уравнения *A*-формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= A_1 \dot{I}_{12} + B_1 \dot{I}_{12} + N_1 \dot{I}_{22} + O_1 \dot{I}_{22} + P_1 \dot{I}_{32} + Q_1 \dot{I}_{32} + R_1 \dot{I}_{42} + S_1 \dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{21} &= A_2 \dot{I}_{12} + B_2 \dot{I}_{12} + N_2 \dot{I}_{22} + O_2 \dot{I}_{22} + P_2 \dot{I}_{32} + Q_2 \dot{I}_{32} + R_2 \dot{I}_{42} + S_2 \dot{I}_{42}; \\ \dot{I}_{11} &= C_1 \dot{I}_{12} + D_1 \dot{I}_{12} + E_1 \dot{I}_{22} + F_1 \dot{I}_{22} + G_1 \dot{I}_{32} + H_1 \dot{I}_{32} + J_1 \dot{I}_{42} + K_1 \dot{I}_{42}; \\ \dot{I}_{21} &= C_2 \dot{I}_{12} + D_2 \dot{I}_{12} + E_2 \dot{I}_{22} + F_2 \dot{I}_{22} + G_2 \dot{I}_{32} + H_2 \dot{I}_{32} + J_2 \dot{I}_{42} + K_2 \dot{I}_{42}, \end{aligned} \right\}$$

где $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1, J_1, K_1, N_1, O_1, P_1, Q_1, R_1, S_1, A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2, J_2, K_2, N_2, O_2, P_2, Q_2, R_2$ и S_2 – коэффициенты уравнений *A*-

формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

В матричном виде уравнения A -формы могут быть представлены так:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & N_1 & O_1 & P_1 & Q_1 & R_1 & S_1 \\ A_2 & B_2 & N_2 & O_2 & P_2 & Q_2 & R_2 & S_2 \\ C_1 & D_1 & E_1 & F_1 & G_1 & H_1 & J_1 & K_1 \\ C_2 & D_2 & E_2 & F_2 & G_2 & H_2 & J_2 & K_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix}.$$

Уравнения A -формы можно представить и в ином виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= A_{11}\dot{U}_{12} + A_{12}\dot{I}_{12} + A_{13}\dot{U}_{22} + A_{14}\dot{I}_{22} + A_{15}\dot{U}_{32} + A_{16}\dot{I}_{32} + A_{17}\dot{U}_{42} + A_{18}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{21} &= A_{21}\dot{U}_{12} + A_{22}\dot{I}_{12} + A_{23}\dot{U}_{22} + A_{24}\dot{I}_{22} + A_{25}\dot{U}_{32} + A_{26}\dot{I}_{32} + A_{27}\dot{U}_{42} + A_{28}\dot{I}_{42}; \\ \dot{I}_{11} &= A_{31}\dot{U}_{12} + A_{32}\dot{I}_{12} + A_{33}\dot{U}_{22} + A_{34}\dot{I}_{22} + A_{35}\dot{U}_{32} + A_{36}\dot{I}_{32} + A_{37}\dot{U}_{42} + A_{38}\dot{I}_{42}; \\ \dot{I}_{21} &= A_{41}\dot{U}_{12} + A_{42}\dot{I}_{12} + A_{43}\dot{U}_{22} + A_{44}\dot{I}_{22} + A_{45}\dot{U}_{32} + A_{46}\dot{I}_{32} + A_{47}\dot{U}_{42} + A_{48}\dot{I}_{42}, \end{aligned} \right\}$$

где $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{25}, A_{26}, A_{27}, A_{28}, A_{31}, A_{32}, A_{33}, A_{34}, A_{35}, A_{36}, A_{37}, A_{38}, A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{44}, A_{45}, A_{46}, A_{47}$ и A_{48} – второй вариант представления коэффициентов уравнений A -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{61} & A_{71} & A_{81} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} & A_{72} & A_{82} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} & A_{37} & A_{38} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} & A_{47} & A_{48} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix}.$$

Количественную связь между выходными и входными напряжениями и токами устанавливают уравнения B -формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{12} &= B_{11}\dot{U}_{11} + B_{12}\dot{I}_{11} + B_{13}\dot{U}_{21} + B_{14}\dot{I}_{21}; \\ \dot{U}_{22} &= B_{21}\dot{U}_{11} + B_{22}\dot{I}_{11} + B_{23}\dot{U}_{21} + B_{24}\dot{I}_{21}; \\ \dot{U}_{32} &= B_{31}\dot{U}_{11} + B_{32}\dot{I}_{11} + B_{33}\dot{U}_{21} + B_{34}\dot{I}_{21}; \\ \dot{U}_{42} &= B_{41}\dot{U}_{11} + B_{42}\dot{I}_{11} + B_{43}\dot{U}_{21} + B_{44}\dot{I}_{21}; \\ \dot{I}_{12} &= B_{51}\dot{U}_{11} + B_{52}\dot{I}_{11} + B_{53}\dot{U}_{21} + B_{54}\dot{I}_{21}; \\ \dot{I}_{22} &= B_{61}\dot{U}_{11} + B_{62}\dot{I}_{11} + B_{63}\dot{U}_{21} + B_{64}\dot{I}_{21}; \\ \dot{I}_{32} &= B_{71}\dot{U}_{11} + B_{72}\dot{I}_{11} + B_{73}\dot{U}_{21} + B_{74}\dot{I}_{21}; \\ \dot{I}_{42} &= B_{81}\dot{U}_{11} + B_{82}\dot{I}_{11} + B_{83}\dot{U}_{21} + B_{84}\dot{I}_{21}, \end{aligned} \right\}$$

где $B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{34}, B_{41}, B_{42}, B_{43}, B_{44}, B_{51}, B_{52}, B_{53}, B_{54}, B_{61}, B_{62}, B_{63}, B_{64}, B_{71}, B_{72}, B_{73}, B_{74}, B_{81}, B_{82}, B_{83}$ и B_{84} – коэффициенты уравнений B -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} \\ B_{71} & B_{72} & B_{73} & B_{74} \\ B_{81} & B_{82} & B_{83} & B_{84} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{21} \end{pmatrix} = \mathbf{B} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{21} \end{pmatrix}.$$

Количественную связь между входными токами, выходными напряжениями и входными напряжениями, выходными токами устанавливают уравнения G -формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{11} &= G_{11}\dot{U}_{11} + G_{12}\dot{U}_{21} + G_{13}\dot{I}_{12} + G_{14}\dot{I}_{22} + G_{15}\dot{I}_{32} + G_{16}\dot{I}_{42}; \\ \dot{I}_{21} &= G_{21}\dot{U}_{11} + G_{22}\dot{U}_{21} + G_{23}\dot{I}_{12} + G_{24}\dot{I}_{22} + G_{25}\dot{I}_{32} + G_{26}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{12} &= G_{31}\dot{U}_{11} + G_{32}\dot{U}_{21} + G_{33}\dot{I}_{12} + G_{34}\dot{I}_{22} + G_{35}\dot{I}_{32} + G_{36}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{22} &= G_{41}\dot{U}_{11} + G_{42}\dot{U}_{21} + G_{43}\dot{I}_{12} + G_{44}\dot{I}_{22} + G_{45}\dot{I}_{32} + G_{46}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{32} &= G_{51}\dot{U}_{11} + G_{52}\dot{U}_{21} + G_{53}\dot{I}_{12} + G_{54}\dot{I}_{22} + G_{55}\dot{I}_{32} + G_{56}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{42} &= G_{61}\dot{U}_{11} + G_{62}\dot{U}_{21} + G_{63}\dot{I}_{12} + G_{64}\dot{I}_{22} + G_{65}\dot{I}_{32} + G_{66}\dot{I}_{42}, \end{aligned} \right\}$$

где $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{15}, G_{16}, G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{24}, G_{25}, G_{26}, G_{31}, G_{32}, G_{33}, G_{34}, G_{35}, G_{36}, G_{41}, G_{42}, G_{43}, G_{44}, G_{45}, G_{46}, G_{51}, G_{52}, G_{53}, G_{54}, G_{55}, G_{56}, G_{61}, G_{62}, G_{63}, G_{64}, G_{65}$ и G_{66} – коэффициенты уравнений G -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} & G_{46} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & G_{55} & G_{56} \\ G_{61} & G_{62} & G_{63} & G_{64} & G_{65} & G_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{G} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix}.$$

Количественную связь между входными напряжениями, выходными токами и входными токами, выходными напряжениями устанавливают уравнения H -формы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{11} &= H_{11}\dot{I}_{11} + H_{12}\dot{I}_{21} + H_{13}\dot{U}_{12} + H_{14}\dot{U}_{22} + H_{15}\dot{U}_{32} + H_{16}\dot{U}_{42}; \\ \dot{U}_{21} &= H_{21}\dot{I}_{11} + H_{22}\dot{I}_{21} + H_{23}\dot{U}_{12} + H_{24}\dot{U}_{22} + H_{25}\dot{U}_{32} + H_{26}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{12} &= H_{31}\dot{I}_{11} + H_{32}\dot{I}_{21} + H_{33}\dot{U}_{12} + H_{34}\dot{U}_{22} + H_{35}\dot{U}_{32} + H_{36}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{22} &= H_{41}\dot{I}_{11} + H_{42}\dot{I}_{21} + H_{43}\dot{U}_{12} + H_{44}\dot{U}_{22} + H_{45}\dot{U}_{32} + H_{46}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{32} &= H_{51}\dot{I}_{11} + H_{52}\dot{I}_{21} + H_{53}\dot{U}_{12} + H_{54}\dot{U}_{22} + H_{55}\dot{U}_{32} + H_{56}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{42} &= H_{61}\dot{I}_{11} + H_{62}\dot{I}_{21} + H_{63}\dot{U}_{12} + H_{64}\dot{U}_{22} + H_{65}\dot{U}_{32} + H_{66}\dot{U}_{42}, \end{aligned}$$

где $H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{14}, H_{15}, H_{16}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{24}, H_{25}, H_{26}, H_{31}, H_{32}, H_{33}, H_{34}, H_{35}, H_{36}, H_{41}, H_{42}, H_{43}, H_{44}, H_{45}, H_{46}, H_{51}, H_{52}, H_{53}, H_{54}, H_{55}, H_{56}, H_{61}, H_{62}, H_{63}, H_{64}, H_{65}$ и H_{66} – коэффициенты уравнений H -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \end{pmatrix}.$$

Количественную связь между токами и напряжениями устанавливают уравнения Y -формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{11} &= Y_{11}\dot{U}_{11} + Y_{12}\dot{U}_{21} + Y_{13}\dot{U}_{12} + Y_{14}\dot{U}_{22} + Y_{15}\dot{U}_{32} + Y_{16}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{21} &= Y_{21}\dot{U}_{11} + Y_{22}\dot{U}_{21} + Y_{23}\dot{U}_{12} + Y_{24}\dot{U}_{22} + Y_{25}\dot{U}_{32} + Y_{26}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{12} &= Y_{31}\dot{U}_{11} + Y_{32}\dot{U}_{21} + Y_{33}\dot{U}_{12} + Y_{34}\dot{U}_{22} + Y_{35}\dot{U}_{32} + Y_{36}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{22} &= Y_{41}\dot{U}_{11} + Y_{42}\dot{U}_{21} + Y_{43}\dot{U}_{12} + Y_{44}\dot{U}_{22} + Y_{45}\dot{U}_{32} + Y_{46}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{32} &= Y_{51}\dot{U}_{11} + Y_{52}\dot{U}_{21} + Y_{53}\dot{U}_{12} + Y_{54}\dot{U}_{22} + Y_{55}\dot{U}_{32} + Y_{56}\dot{U}_{42}; \\ \dot{I}_{42} &= Y_{61}\dot{U}_{11} + Y_{62}\dot{U}_{21} + Y_{63}\dot{U}_{12} + Y_{64}\dot{U}_{22} + Y_{65}\dot{U}_{32} + Y_{66}\dot{U}_{42}, \end{aligned} \right\}$$

где $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}, Y_{15}, Y_{16}, Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}, Y_{25}, Y_{26}, Y_{31}, Y_{32}, Y_{33}, Y_{34}, Y_{35}, Y_{36}, Y_{41}, Y_{42}, Y_{43}, Y_{44}, Y_{45}, Y_{46}, Y_{51}, Y_{52}, Y_{53}, Y_{54}, Y_{55}, Y_{56}, Y_{61}, Y_{62}, Y_{63}, Y_{64}, Y_{65}$ и Y_{66} – коэффициенты уравнений Y -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}.$$

Количественная связь между напряжениями и токами устанавливается уравнения Z -формы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= Z_{11}\dot{I}_{11} + Z_{12}\dot{I}_{21} + Z_{13}\dot{I}_{12} + Z_{14}\dot{I}_{22} + Z_{15}\dot{I}_{32} + Z_{16}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{21} &= Z_{21}\dot{I}_{11} + Z_{22}\dot{I}_{21} + Z_{23}\dot{I}_{12} + Z_{24}\dot{I}_{22} + Z_{25}\dot{I}_{32} + Z_{26}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{12} &= Z_{31}\dot{I}_{11} + Z_{32}\dot{I}_{21} + Z_{33}\dot{I}_{12} + Z_{34}\dot{I}_{22} + Z_{35}\dot{I}_{32} + Z_{36}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{22} &= Z_{41}\dot{I}_{11} + Z_{42}\dot{I}_{21} + Z_{43}\dot{I}_{12} + Z_{44}\dot{I}_{22} + Z_{45}\dot{I}_{32} + Z_{46}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{32} &= Z_{51}\dot{I}_{11} + Z_{52}\dot{I}_{21} + Z_{53}\dot{I}_{12} + Z_{54}\dot{I}_{22} + Z_{55}\dot{I}_{32} + Z_{56}\dot{I}_{42}; \\ \dot{U}_{42} &= Z_{61}\dot{I}_{11} + Z_{62}\dot{I}_{21} + Z_{63}\dot{I}_{12} + Z_{64}\dot{I}_{22} + Z_{65}\dot{I}_{32} + Z_{66}\dot{I}_{42}, \end{aligned} \right\}$$

где $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{15}, Z_{16}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{24}, Z_{25}, Z_{26}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{33}, Z_{34}, Z_{35}, Z_{36}, Z_{41}, Z_{42}, Z_{43}, Z_{44}, Z_{45}, Z_{46}, Z_{51}, Z_{52}, Z_{53}, Z_{54}, Z_{55}, Z_{56}, Z_{61}, Z_{62},$

Z_{63} , Z_{64} , Z_{65} и Z_{66} – коэффициенты уравнений Z -формы, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами.

А в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{21} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \end{pmatrix} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}.$$

Результаты дальнейших исследований утверждают, что коэффициенты A , D , F , H , K , N и P безразмерны, коэффициенты B , S , O и Q имеют размерность сопротивления (Ом), а коэффициенты C , E , G и J – размерность проводимости (См).

Проверку условий обратимости и симметрии анализируемого восьмиполюсника выполнять в данном случае не имеет смысла, поскольку восьмиполюсник с тремя входными и пятью выходными выводами в принципе не может быть ни обратимым, ни симметричным.

Примером объекта электроэнергетики, который может быть замещен пассивным восьмиполюсником с тремя входными и пятью выходными выводами, может служить часть электроэнергетической системы, входом для которой двухпроводная линия электропередачи. А ее выход обеспечивают две двухпроводные линии или одна четырехпроводная с изолированной нейтралью. Внутри такого восьмиполюсника может находиться один или несколько распределительных пунктов, одно или несколько преобразовательных устройств и другие электроэнергетические и электротехнические устройства. Укрупненная схема замещения этой части электроэнергетической системы показана на рис. 3. Здесь символами Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 и Z_6 обозначены продольные параметры замещаемой части электроэнергетической системы, а символами Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 , Y_7 , Y_8 , Y_9 , Y_{10} , Y_{11} , Y_{12} и Y_{13} – поперечные.

Полученный таким образом восьмиполюсник может быть описан уравнениями любой из представленных форм, например уравнениями A -формы. Численные значения коэффициентов этих уравнений определяются экспериментально по методике, изложенной в работе [13]. После этого при известных выходных напряжениях и токах можно сравнительно просто определить напряжения и токи на входе анализируемой части электроэнергетической системы.

Первичными параметрами анализируемой части электроэнергетической системы в данном случае следует считать параметры схемы замещения этого объекта, изображенной на рис. 3. При известных напряжениях и токах на входе и на выходе объекта задача определения параметров этой схемы замещения сводится к задаче синтеза электрических цепей. В данном случае это сравнительно несложная задача.

3. Результаты

Каждая из приведенных здесь форм уравнений, описывающих состояние восьмиполюсника с тремя входными и пятью выходными выводами, вполне применима в той или иной области электротехники. Например, в силовой электроэнергетике предпочтительны сведения о количественной связи между входными и выходными характеристиками электрической энергии. Такую связь устанавливают уравнения A -формы и B -формы. В данном случае предпочтительны уравнения A -формы, поскольку именно в этих уравнениях количество неизвестных (входных напряжений и токов) меньше количества известных (выходных напряжений и токов).

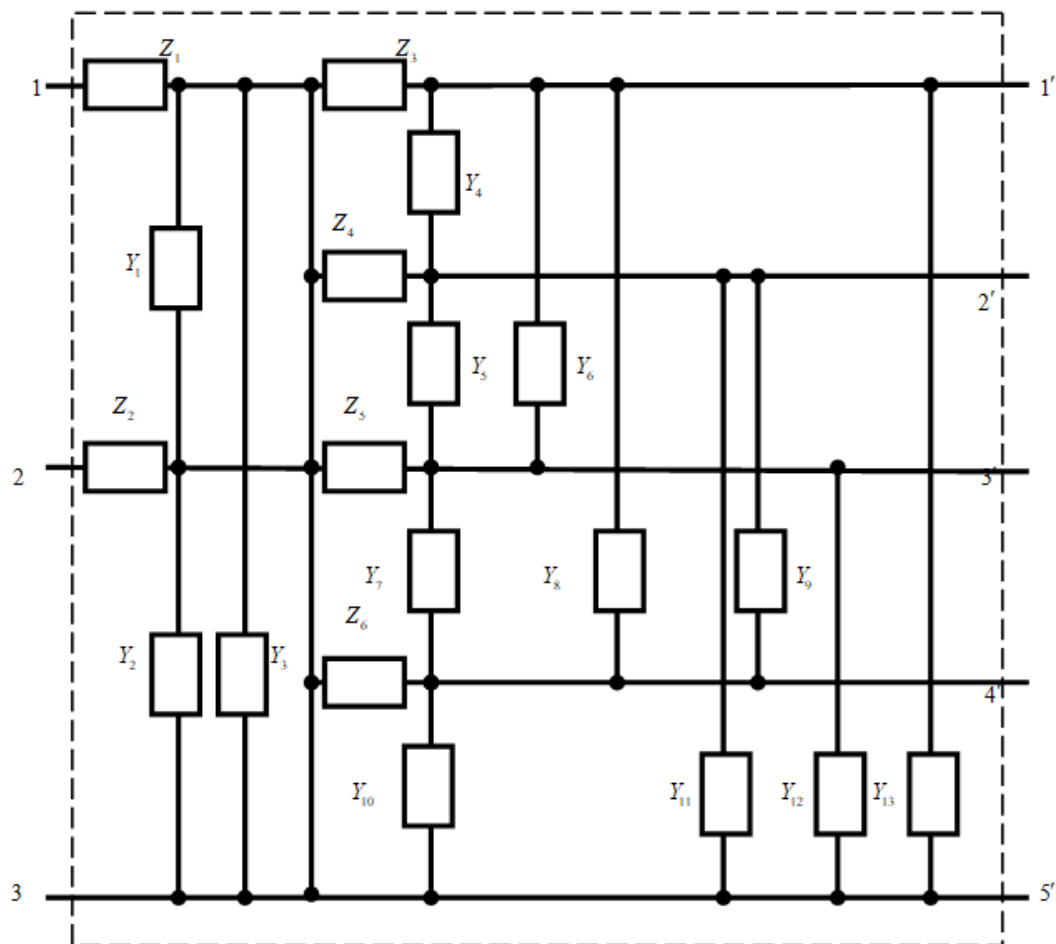


Рис. 3. Пример замещения пассивным восьмиполусником с тремя входными и пятью выходными выводами части электроэнергетической системы

4. Заключение

Рассмотренные здесь элементы теории восьмиполусников позволят провести объективный анализ электротехнического оборудования трехфазного исполнения, а также трехфазных электроэнергетических систем. Развитие теории восьмиполусников открывает новые возможности такого анализа, например: объективный анализ распределения электрической энергии по участкам электроэнергетических систем, определение параметров линий электропередачи трехпроводного исполнения и т.д.

Разработанные здесь элементы теории восьмиполусников могут быть образцом для формирования теорий десятиполусников, двенадцатиполусников, четырнадцатиполусников, которыми в условиях пониженного качества электрической энергии могут быть замещены, например, трехфазные линии электропередачи четырехпроводного исполнения, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом, пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка элементов теории многополусников и иных исполнений.

Литература

1. Воронов Р.А. Общая теория четырехполусников и многополусников. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. 192 с.

2. Зевеке Г.В. Многополюсники. М.: МЭИ, 1971. 23 с.
3. Попов Н.М., Олин Д.М., Кирилин А.А. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестник КрасГАУ. 2017. № 2. С. 88–97.
4. Барабанов Е.А., Мальцева И.С., Барабанов И.О. Алгоритм параллельной обработки данных в оптических сетях // Научный вестник НГТУ. 2004. Т. 56, № 3. С. 88–95.
5. Салимоненко Д.А. Применение методов линейного программирования для определения параметров электрических цепей. Часть 1. // Вестник Башкирского ун-та. 2015. Т. 20, № 4, С. 1155–1163.
6. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып. 5. С. 16–21.
7. Китаев А.В., Агбомассу В.Л., Глухова В.И. Схемы замещения электрических двигателей переменного тока // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. № 11 (87). С. 59–65.
8. Беликов Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Часть 2. М.:НТФ Энергопрогресс, 2013. 92. с.
9. Федотов Ю.Б., Нестеров С.А., Мустафа Г.М. Повышение эффективности программ моделирования устройств силовой электроники // Apriori. Серия: естественные и технические науки. 2015. № 6. С. 1–14.
10. Тлустенко С.Ф., Коптев А.Н. Разработка и исследование методологии информационного обеспечения технологических систем агрегатно-сборочного производства летательных аппаратов // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т. 17, № 6 (2). С. 491–497.
11. Методика проектирования и перспективная конструкция средств снижения шумов судовых трубопроводов /А.Н. Крюков, Е.В. Шахматов, В.Н. Самсонов, А.Н. Дружин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 67–79.
12. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network. //European Researcher. 2013. Vol. (40), № 2–1. Pp. 259–267.
13. Большанин Г.А. Восьмиполюсники. Ч. 1. Братск: ФГБОУ ВО «БрГУ», 2018. 214 с.

Автор публикации

Большанин Георгий Анатольевич – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета.

References

1. Voronov R.A. The general theory of four-ports and multipoles. M.-L. : Gosenergoizdat, 1951, 192 p.
2. Zeveke G.V. Multipolar network. Moscow: MEI, 1971, 23 p.
3. Popov N.M., Olin D.M., Kirilin A.A. The method of signal transmission over rural distribution networks 0.38 kV. Bulletin of KrasAA. 2017. No. 2. Pp. 88-97.
4. Barabanov E.A., Maltseva I.S., Barabanov I.O. Algorithm for parallel processing of data in optical networks // Scientific Bulletin of the NSTU. 2004. T.56, №3. P. 88-95.
5. Salimonenko D.A. Application of linear programming methods for determining the parameters of electrical circuits Part 1.// Herald of the Bashkir University. 2015. T.20, No. 4. P. 1155-1163.
6. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Determine the fault location of the power line by the instantaneous values of the alarm events. //Bulletin of ISEU. 2016. Issue 5. Pp. 16–21.
7. Kitaev A.V., Agbomatsu V.L., Glukhova V.I. Schemes of replacement of electric motors of an alternating current. //Electrical and Computer Systems. 2013. No. 11 (87). Pp. 59–65.
8. Belikov Yu.S. Multipole network as a model of electrical systems. Part 2. M.:NTF Energoprogress, 2013. 92. p.
9. Fedotov Yu.B., Nesterov S.A., Mustafa G.M. Increasing the effectiveness of simulation programs for power electronics devices. // Apriori. Series: natural and technical sciences. 2015. No. 6. Pp. 1–14.

10. Tlustenko S.F., Koptev A.N. Development and research of methodology of information support of technological systems of aggregate-assembly production of aircraft. // Proceedings of the Samara Scientific Center of RAS. 2015. T.17, No. 6 (2). Pp. 491–497.

11. Design methodology and perspective design of noise reduction means for ship pipelines. /A.N. Kryukov, E.V. Shakhmatov, V.N. Samsonov, A.N. Druzhin. // Fundamental and applied hydrophysics. 2014. T.7, №3. P. 67–79.

12. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network.// European Researcher. 2013. Vol(40), №2-1. Pp. 259–267.

13. Bolshanin G.A. The eight-poles. Part 1. Bratsk: FGBOU V BrSU, 2018. 214 p.

Author of the publication

Georgiy A. Bolshanin – PhD (techn) Sci, professor, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Bratsk State University.

Поступила в редакцию

22 мая 2018 г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 681.5

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СТЕНДА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В.Р. Иванова, Л.В. Фетисов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

Резюме: в работе предлагается описание и разработка демонстрационного стенда «Автоматический ввод резервного питания» для возможности наглядного изучения и понимания многостороннего питания для обеспечения надежности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: схемы питания, автоматика, оборудование, стенд, выключатель, миниконтактор, защита потребителей.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-120-128

Для цитирования: Иванова В.Р., Фетисов Л.В. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 120-128. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-120-128.

DEVELOPMENT OF TRAINING BENCH FOR EFFECTIVE AND SAFE OPERATION OF BACKUP POWER AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

V.R. Ivanova¹, L.V. Fetisov²

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Abstract: The paper suggests the description and development of the demonstration stand «Automatic switch of stand-by power supply» for possibility of visual study and understanding of the multi-purpose power supply to ensure the reliability of electricity supply to consumers.

Keywords: power supply circuits, automation, equipment, stand, switch, minicontactor, consumer protection.

For citation: V.R. Ivanova, L.V. Fetisov Development of training bench for effective and safe operation of standby power supply at industrial enterprises // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 120-128. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-120-128.

В работе предлагается усовершенствованная схема автоматического ввода резерва для возможности реализации и использования в учебных заведениях, для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Целью создания стенда является введение в учебный процесс усовершенствованного оборудования и наглядного обучения основам бесперебойного питания потребителей.

В настоящее время существует большое количество схем и вариантов исполнения автоматического ввода резерва (АВР), однако в образовательных учреждениях демонстрационные стенды, характеризующие АВР, выполнены на устаревшем оборудовании в плане технического исполнения. Поэтому создание новой схемы для реализации АВР на современном оборудовании стало актуальным.

На первом этапе реализации проекта был произведен аналитический обзор известных схем АВР и рассмотрены варианты организации автоматического включения резервного питания для выявления недостатков и преимуществ последних.

Все схемы автоматического ввода резервного питания делятся на

- схему с двумя независимыми вводами и объединенными на выходе в одну цепь нагрузки. В аварийном и нормальном режимах работы подключен один из питающих вводов;

- схему, имеющую два независимых ввода и два независимых выхода для подключения нагрузки, которые объединены на выходе секционным выключателем. В нормальном режиме подключены оба питающих ввода, в аварийном – один [1–5].

Несмотря на многообразие вариантов резервирования линий, можно выделить следующие организации автоматического ввода резервного питания.

1. Схема АВР с источником (линия или трансформатор), находящимся в резерве.

Схема состоит из двух независимых источников питания 1 и 2. В нормальном режиме используется источник 1, при его отказе происходит отключение магнитного пускателя ПМ1 и включается ПМ2, тем самым восстанавливая напряжение на шинах питания (рис. 1).

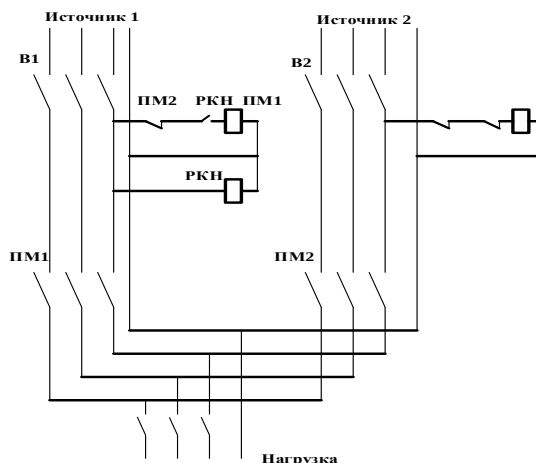


Рис. 1. Схема АВР с двумя источниками

2. Схема АВР с генератором, находящимся в резерве.

В качестве резервного источника в схеме используется генератор Г. При возникновении сбоя в питании от основной сети устройство АВР автоматически запускает генератор Г и отключает ПМ1, и после выхода генератора Г на рабочий режим включает ПМ2 (рис. 2).

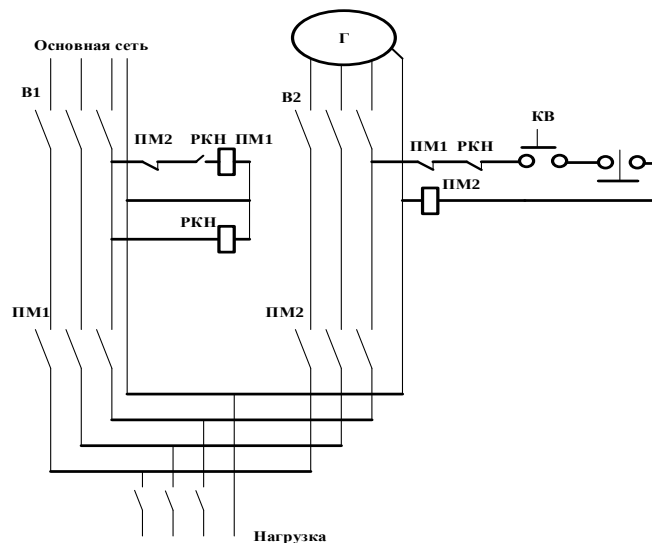


Рис. 2. Схема АВР с генератором, находящимся в резерве

3. Схема АВР с секционированием (рис. 3).

На рис. 3 оба источника ВВОД1 и ВВОД2 работают одновременно при отключенном секционном выключателе QF3. При выходе из строя одного из источников отключается вводной выключатель отказавшего источника и включается секционный выключатель QF3.

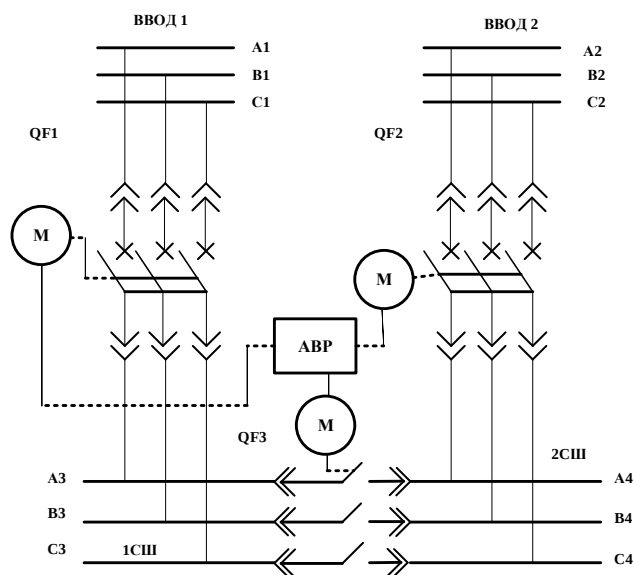


Рис. 3. Схема АВР с секционированием

4. Схемы быстродействующих АВР (БАВР) (рис. 4).

Микропроцессорные устройства БАВР являются одним из основных элементов построения системы гарантированного электроснабжения потребителей, относящихся к первой категории. Данные устройства позволяют быстро зафиксировать факт нарушения энергоснабжения, определить его характер и сформировать управляющие воздействия на коммутационные аппараты. Использование БАВР, совместно со специализированными быстродействующими вводными и секционными выключателями, позволяет уменьшить экономический ущерб от нарушения электроснабжения за счет сохранения непрерывности технологического процесса и уменьшения вероятности возникновения аварийных ситуаций, связанных с возможным недопустимым снижением производительности или полной остановкой ответственных механизмов за счет уменьшения времени перехода на резервный источник питания.

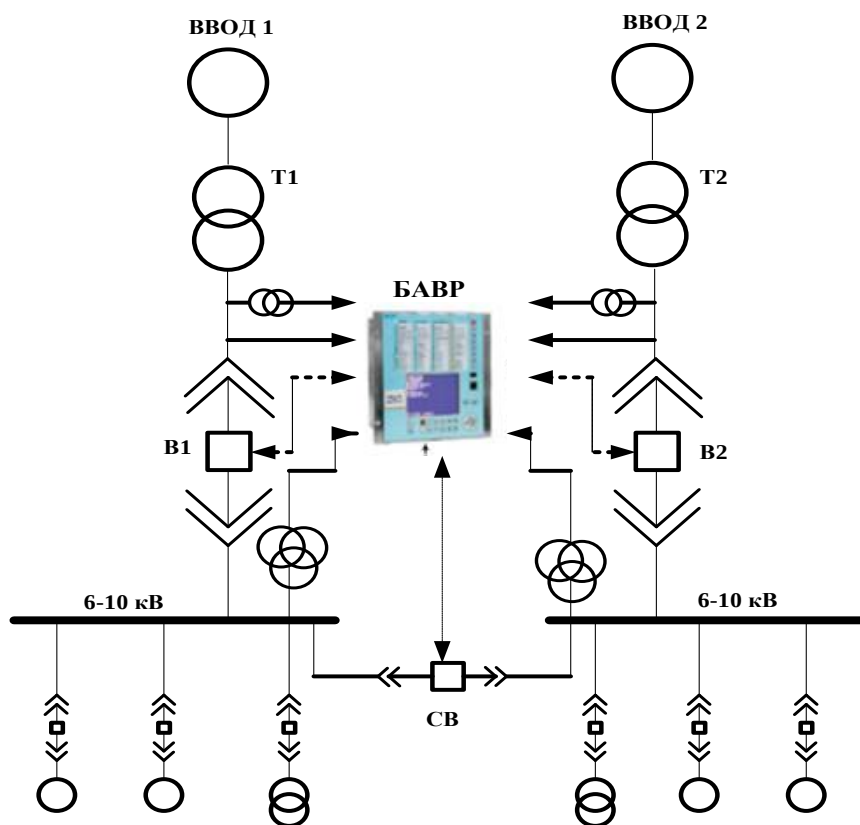


Рис. 4. Схема быстродействующих АВР (БАВР)

В лабораторной установке реализован вариант АВР при наличии двух источников питания и нормально отключенного секционного выключателя. Элементы блока АВР размещены в корпусе стенда. На рис. 5 показана принципиальная электрическая схема.

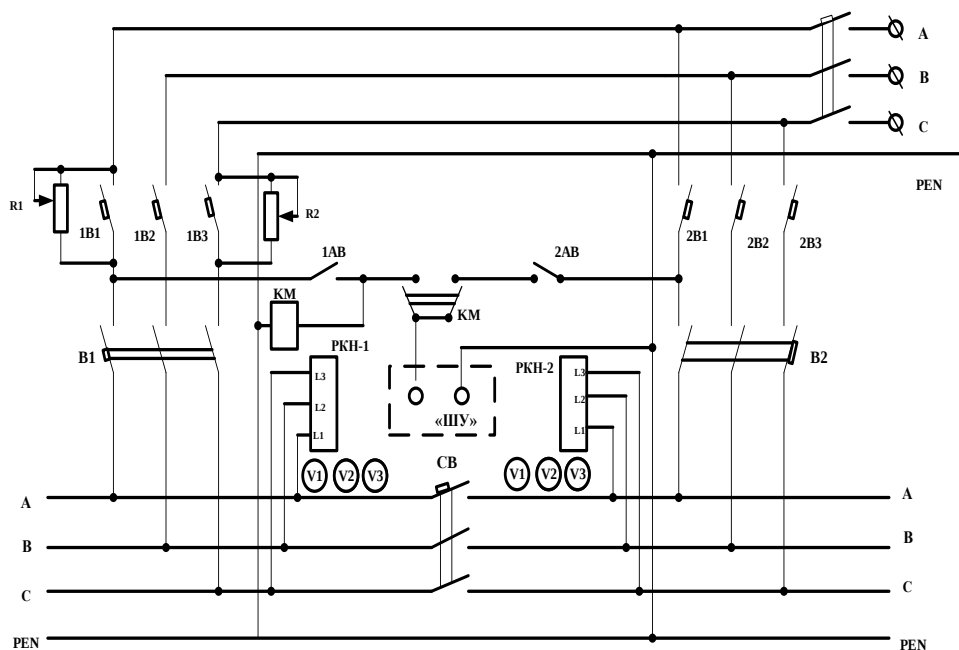


Рис. 5. Принципиальная схема АВР

Стенд разработан и выполнен для наглядного изучения работы автоматических выключателей при опробованиях схемы АВР, путем интерактивного изучения функции переключения с основной линии питания на резервную и наоборот, с резервной – на основную, а также для повышения интереса у учащихся к образовательному процессу. Коммутационные аппараты имеют возможность установки механической блокировки.

Максимальный ток потребления демонстрационного стенда, который работает от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц с действующим значением напряжения 380 В, составляет 6 А. Питающий кабель подключен к трехполюсному автоматическому выключателю на 6 А, установленному с правого торца демонстрационного стенда. На лицевой стороне стенда представлены реальные образцы автоматических выключателей, указательных и промежуточных реле, реле тока, миниконтактор, ключ управления АВР, световые сигнализаторы положения силовых выключателей; присутствуют логические элементы и основные компоненты цифровой электроники. Последние – это регуляторы напряжения, индикаторы напряжения. Также изображена мнемосхема самого стенда. На рис. 6, а показан стенд на этапе сборки комплектующих, а на рис. 6, б – внешний вид готового стенда с мнемосхемой.

Функциональные возможности стенда:

1. Регулирование выходного напряжения на ВВОДЕ 1 в диапазоне от 30 до 230 В.
2. Возможность имитации перекоса или потери напряжения на обоих вводах.
3. Возможность подачи тока от 0 до 10 А для проверки срабатывания токовой защиты.
4. Возможность имитации работы реле с помощью кнопки.



Рис. 6, а. Фотография стенда на этапе сборки



Рис. 6, б. Фотография внешнего вида демонстрационного стенда с двумя системами шин

Оборудование выбиралось по функциональности. Например, автоматические выключатели вводов и секционного выключателя выбирались только с электроприводом – такая конструкция упрощает составление схемы; не требуется отдельно использовать кнопки управления, так как на электроприводе установлен рычаг переключения автоматического выключателя и встроенный переключатель положения. Помимо этого, при разработке схемы АВР была выполнена модернизация автоматического выключателя с электроприводом, суть которой состоит в увеличении количества контактов за счет использования промежуточного реле РЭК 77/4. Для возможности имитировать токовую

защиту и проведения лабораторных работ подобрано статическое реле РСТ-80-1, на котором можно выставить и проверить настройку заданных параметров.

Описание выбранного оборудования

1. Автоматические выключатели ВА47-29 предназначены для использования в одно- или трехфазной электрической сети 220 – 380 В в системе электроснабжения с заземленной нейтралью частотой 50 Гц. Автоматические выключатели ВА47-29 рекомендуются к применению в вводно-распределительных устройствах для жилых и общественных зданий. На стенде используется автоматический выключатель типа ВА47-29М для включения общего питания.

2. Миниактор МКН (КМ)-10911. Главным критерием выбора миниактора стали габаритные размеры элемента и наличие указателя положения актора. Основные характеристики МКН:

- а) номинальное напряжение катушки управления 230 В;
- б) диапазон напряжения управления:
 - срабатывание – $(0,85 \div 1,1) U_c$;
 - отпускание – $(0,2 \div 0,75) U_c$;
- в) компактная конструкция подвижной части магнитной и контактной систем обеспечивает высокое быстродействие и частоту коммутаций до 3600 циклов включения/отключения в час, что важно при использовании акторов в автоматизированном технологическом оборудовании;
- г) возможность установки на МКН модуля дополнительных контактов;
- д) возможность установки МКН на DIN-рейку;
- ж) горизонтальное расположение магнитной системы дает возможность устанавливать и эксплуатировать МКН как на вертикальной, так и на горизонтальной плоскостях без ухудшения коммутационных свойств.

3. Автоматический выключатель тип ВА88–32 предназначен для отключения тока при коротких замыканиях, перегрузке, недопустимых снижениях напряжения. Находит применение в жилом и гражданском строительстве, производственных объектах, на подстанциях и распределительных пунктах. При выборе данного устройства руководствовались следующими критериями: удобство монтажа за счет свободного пространственного расположения без изменения номинальных характеристик и работоспособности выключателя; компактность; возможность замены старых автоматических выключателей; корпус выполнен из устойчивого к деформациям материала; возможность самостоятельной установки вспомогательных устройств для ВА88-32 (расцепитель минимального напряжения РМ32/33, дополнительные контакты ДК32/33, аварийные контакты АК32/33) путем вставки их в специальные ниши, причем наличие двойной изоляции исключает риск контакта с активными частями, что повышает безопасность обслуживания.

4. Для дистанционного включения и отключения в автоматическом режиме автоматического выключателя ВА88–32 выбран электропривод ЭП-32/33. ЭП-32/33 допускает возможность перехода на ручное управление выключателем при отсутствии напряжения в цепи управления.

5. Для увеличения количества контактов у автоматического выключателя и электропривода в схему было введено промежуточное реле РЭК 77/4. Данные реле промежуточные электромагнитные серии РЭК 77/4 применяются в цепях управления электроприводами переменного тока напряжением до 240 В частоты 50 Гц и в цепях постоянного тока напряжением до 220 В. Реле комплектуются розетками РРМ 77/4 и предназначены для крепления на DIN – рейку шириной 35 мм.

6. Для световой сигнализации была выбрана световая арматура со светодиодной матрицей AD-22DS (LED), назначение которой – индикация состояния электрических цепей и рабочего состояния оборудования стенда (цвет свечения белый, синий, красный,

зеленый). Преимущества: большой срок службы; безинерционность; отсутствие нагревания источников света и вторичной оптики; большой световой поток по сравнению с аналогами.

7. Для имитации токовой защиты в схеме выбрано статическое реле РСТ-80-1. Рассматриваемое реле предназначено для применения в схемах релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем в цепях переменного тока частотой 50 Гц. Реле устойчивы к воздействию помех в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4. Функциональные возможности реле: токовая отсечка, обеспечивающая быстрое срабатывание (не более 0,1) при превышении током величины, равной уставке тока отсечки; максимальная токовая защита (МТЗ), обеспечивающая срабатывание с зависимой или независимой от тока выдержкой времени.

С помощью данного стенда можно имитировать следующие виды работ:

1. Автоматическое включение резервного питания при наличии двух независимых источников электроэнергии.
 2. Посадка и провалы напряжения в системе электроснабжения, работа АВР как защита потребителей.
 3. Блокировка АВР при коротком замыкании на землю.
- Лабораторный практикум находится на этапе разработки.

Литература

1. Performance evaluation and operation of Auto Load transfer switch/ Diponkar Paul, Md. Shariful Islam, Syed Khalid Rahman, Md. Saiful Islam, Mir Mohiuddin //International Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2013. 2(6). P. 205–211.
2. Галеев Э.Г. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики линий электропередач / Э.Г. Галеев, И.Ю. Иванов, И.Л. Кузьмин и др. СПб.: ПЭИПК, 2016. 198 с.
3. Optimal Charging and Discharging Scheme of Battery Energy Storage System in Active Distribution Network /Author(s): ZHU Zefeng, ZHAO Jinquan, WEI Wenhui, LIN Changnian, YU Yiping, Journal: Automation of Electric Power Systems. Year: 2016. Issue: 20. Pages: 47–54.
4. Сычев Ю.А. Многоступенчатая система автоматического ввода резерва в электрических сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса / Ю.А. Сычев, А.В. Федоров, Р.Ю. Зимин // Современная наука и практика. 2016. № 9. С. 22–26.
5. Турсунбекова Л.С. Обеспечение бесперебойного электроснабжения / Л.С. Турсунбекова // Наука и инновационные технологии // 2017. Т.3, № 2. С. 102–104.
6. Пат. № 2326481 РФ. Способ автоматического включения резервного электропитания потребителей и устройство для его осуществления / Цырук С.А., Гамазин С.И., Пупин В.М., Козлов В.Н., Павлов А.О. 07.11.2006.
7. Пат. № 2624921 РФ. Устройство автоматического включения резерва / Винограденко А.М., Будко П.А., Веселовский А.П., Литвинов А.И., Гладкова К.О., Тищенко Л.М. 12.07.2016.
8. Коробейников Б.А. Быстродействующий автоматический ввод резерва в системах электроснабжения сахарных заводов / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. №1. С. 86–88.
9. Кулакевич А.Н. Автоматический ввод резерва – надежный способ бесперебойного электроснабжения / А.Н. Кулакевич, Б.В. Клименко // Електротехніка і Електромеханіка. Изд. Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт». 2010. № 1. С. 55–60.
10. Крюков Ю.А. Разработка интеллектуальной релейной защиты в сочетании с быстродействующим автоматическим вводом резерва / Ю.А. Крюков, Е.Ф. Киров, О.Е. Наумов, В.В. Иванов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 1. С. 9–13.

Авторы публикации

Иванова Вилия Равильевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭ) Казанского государственного

энергетического университета (КГЭУ).

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

References

1. Performance evaluation and operation of Auto Load transfer switch/ Diponkar Paul, Md. Shariful Islam, Syed Khalid Rahman, Md. Saiful Islam, Mir Mohiuddin //International Journal of Renewable and Sustainable Energy 2013; 2(6): 205–211.
2. Galeev E.G. Microprocessor devices for relay protection and automation of power lines / E.G. Galeev, I.Yu. Ivanov, I.L. Kuzmin and others. SPb.: PEIPK, 2016. 198 p.
3. Optimal Charging and Discharging Scheme of Battery Energy Storage System in Active Distribution Network /Author(s): ZHU Zefeng, ZHAO Jinquan, WEI Wenhui, LIN Changnian, YU Yiping, Journal: Automation of Electric Power Systems. Year: 2016. Issue: 20. Pages: 47–54.
4. Sychev Yu. A. A multi-stage system of automatic reserve input in electric networks of enterprises of the mineral-raw complex / Yu.A. Sychev, A.V.Fedorov, R.Yu. Zimin // Modern Science and Practice. 2016. № 9. P. 2 –26.
5. Tursunbekova L.S. Provision of uninterrupted power supply / L.S. Tursunbekova // Science and innovative technologies // 2017. V.3, No. 2. P.102–104.
6. Patent for invention of the Russian Federation № 2326481. The method of automatic switching on backup power supply of consumers and the device for its implementation // Patent RF / Tsyruk S.A., Gamazin S.I., Pupin V.M., Kozlov V.N., Pavlov A.O. 07.11.2006.
7. Patent for invention of the Russian Federation № 2624921. Automatic switch-on device // Patent of the Russian Federation / Vinogradenko A.M., Budko P.A., Veselovsky A.P., Litvinov A.I., Gladkova K.O., Tischenko L.M. July 12, 2016.
8. Korobeinikov B.A. High-speed automatic input of the reserve in the power supply systems of sugar plants / B.A. Korobeinikov, A.I. Ischenko // News of Higher Educational Establishments. Food technology. 2008. № 1. P. 86–88.
9. Kulakevich A.N. Automatic input of a reserve is a reliable method of uninterrupted power supply / A.N. Kulakevich, B.V. Klimenko // Elektrotehnika i Elektromehika, 2010. № 1. Ed. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". P. 55–60.
10. Kryukov Yu.A. Development of intelligent relay protection in combination with high-speed automatic input of the reserve / Yu. A. Kryukov, E.F. Kirov, O.E. Naumov, V.V. Ivanov // Energy security and energy saving. 2016. № 1. P. 9–13.

Authors of the publication

Viliya R. Ivanova– PhD (Techn.) Sci., associate professor, department "Electrical Equipment and Electricity of Enterprises, Organizations and Institutions", Kazan state power engineering university.

Leonid V. Fetisov – PhD (Techn.) Sci., associate professor, department "Electrical Equipment and Electricity of Enterprises, Organizations and Institutions", Kazan state power engineering university.

Поступила в редакцию

17 июля 2018 г.



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ОПОР

И.З. Гатиятов¹, Л.С. Сабитов^{1,2}, Н.Ф. Кашапов², И.Р. Гильманшин²,
И.К. Киямов²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
gatiyatov.iz@kgeu.ru

Резюме: Известные способы испытания опор создают продольные и поперечные статические нагрузки, приложенные к опоре. В реальных условиях эксплуатации значительная часть повреждений опор связана с воздействием на них динамических нагрузок, которые могут превосходить статические. Предложенный способ позволит провести экспериментальные исследования процессов каскадного разрушения анкерного участка вследствие обрыва проводов, когда потенциальная энергия натяжения проводов преобразуется в динамическое воздействие на конструкцию опор.

Ключевые слова: надежность, способ испытания, динамические нагрузки, система опор.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-129-137

Для цитирования: Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кашапов Н.Ф., Гильманин И.Р., И.К. Киямов Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 129-137. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-129-137.

THE DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE OF DYNAMIC TESTS OF SUPPORTS

I.Z. Gatiyatov¹, L.S.Sabitov^{1,2}, N.F.Kashapov², I.R.Gilmanshin², I.K.Kiymov²

¹Kazan state power engineering University, Kazan, Russia

²Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia
gatiyatov.iz@kgeu.ru

Abstract: Known methods of testing supports create longitudinal and transverse static load applied to the support. In real conditions the majority of the damage of the supports is connected with the influence on them of dynamic loads, which can exceed the static. The proposed method allows to conduct experimental studies of cascade processes of destruction of anchor site due to a wire breakage, when the potential energy of the tension wires is converted into a dynamic influence on the design of supports.

Keywords: reliability, testing method, dynamic loads, support system.

For citation: I.Z. Gatiyatov, L.S. Sabitov, N.F. Kashapov, I.R. Gilmanshin, I.K. Kiymov Methods and systems of inspection of supports of tubular rods used in power engineering construction when exposed to static and

Металлические и железобетонные опоры нашли широкое применение в практике сетевого строительства. Они обладают рядом преимуществ перед деревянными опорами и сооружаются на особо ответственных линиях, где требуется высокая эксплуатационная надежность, а также на территории больших городов и поселков. Кроме того, металлические опоры устанавливаются на больших переходах через реки и другие инженерные сооружения, в промышленных районах и на горных участках.

Оценка влияния на прочность и деформативность опор динамических нагрузок, связанных, например, с обрывом проводов, вследствие гололедных аварий или усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима, в настоящее время проводится только с помощью различных компьютерных программ.

Известные способы испытания опор создают продольные и поперечные нагрузки, приложенные к опоре [1]. Недостатком этих способов является то, что напряженно-деформированное состояние конструкции опоры производят при приложении к ней статических нагрузок, при том что в реальных условиях эксплуатации значительная часть повреждений опор связана с воздействием на них динамических нагрузок, которые могут превосходить статические почти в два раза [2].

Близким аналогом к предложенному является способ динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи, включающий: закрепление на верхней части опоры конца тросовой тяги с калиброванной разрывной вставкой и динамометром, другой конец которой соединен с лебедкой; воздействие на опору импульсной нагрузкой, создаваемой в результате разрыва калиброванной на заданное усилие вставки при натяжении лебедкой тросовой тяги до этого усилия, и определение отклика опоры на воздействие импульса нагрузки [3, 4]. Недостатком известного способа является то, что согласно ему предусмотрено проведение динамических испытаний только единичной стойки опоры воздушных линий электропередачи без учета действия на опору вертикальных нагрузок от собственного веса проводов и гололеда, а также упругого натяжения проводов.

Технический результат настоящего изобретения заключается в обеспечении динамических испытаний единой системы опор, объединенных упругими механическими связями в виде тросовых тяг с встроенными пружинами растяжения, моделирующей реальный анкерный участок для определения их динамических характеристик как в расчетных условиях, так и в аварийных режимах, вызванных воздействием гололедных нагрузок, превышающих предельные значения, включающих разрушение конструкций опор.

Достижение этого технического результата обеспечивается за счет того, что в известном способе, описанном выше, на основании силовой прямоугольной рамы стенда для динамических испытаний опор устанавливают не менее трех промежуточных опор, моделирующих анкерный участок, в котором боковые стойки рамы представляют собой макеты анкерных опор. На изоляторах, установленных на траверсах, закрепляют тросовые тяги с встроенными в них калиброванными разрывными вставками, динамометрами и пружинами растяжения. При этом зависимость между усилием растяжения и удлинением пружины соответствует зависимости силы натяжения провода в реальном пролете от его удлинения, вызванного воздействием на провод нагрузки от собственного веса провода и веса гололеда. Кроме того, концы тросовых тяг через блоки, установленные на верхней части боковой стойки рамы, соединяют с соответствующими лебедками, закрепленными на основании рамы. Наряду с этим, на каждом изоляторе опоры закрепляют тарировочный груз, вес которого равен разности между весом провода в реальном пролете и весом тросовой тяги с встроенными в нее калиброванной разрывной вставкой, динамометром и

пружиной растяжения, которая закреплена в пролете между двумя опорами, установленными на стенде. Натяжение тросовых тяг с помощью лебедок осуществляют до разрыва одной из калиброванных вставок, рассчитанных на минимальное усилие натяжения тросовой тяги, определяемое нагрузкой от собственного веса провода в пролете. При разрыве калиброванной вставки определяют отклик промежуточных опор на воздействие импульсной нагрузки, включая измерение амплитуды и собственной частоты колебаний опор, с помощью датчиков перемещения, установленных на верхней балке рамы. При этом тензодатчиками определяют механические напряжения в критических точках конструкций опор в период воздействия на опоры импульсной нагрузки.

Аналогичным путем повторяют описанные операции после закрепления на изоляторах дополнительных грузов, вес которых соответствует весу гололеда с возрастающей толщиной его стенки (включая ее максимальное значение). С учетом увеличения силы натяжения провода в пролете повышают величину усилия разрыва калиброванной вставки до значения, соответствующего этой дополнительной нагрузке и собственному весу провода.

После окончания испытаний по моделированию воздействия на провод гололеда с максимальной толщиной стенки устанавливают величину усилия разрыва калиброванной вставки (равную усилию разрыва провода), и за счет натяжения тросовой тяги производят разрушение наименее прочной конструкции опоры (при этом вследствие редукации тяжения проводов разрушаются конструкции опор в соседних с аварийным пролетах). Регистрируют основные параметры процесса разрушения конструкций опор и определяют коэффициенты динамичности опор.

Установка не менее трех промежуточных опор на основании силовой прямоугольной рамы, моделирующих анкерный участок, в котором боковые стойки рамы представляют собой макеты анкерных опор, закрепление на изоляторах, установленных на траверсах, тросовых тяг с встроенными в них калиброванными разрывными вставками, динамометрами и пружинами растяжения, являющимися упругими эквивалентами проводов в промежуточных пролетах, у которых зависимость между усилием растяжения и удлинением пружины соответствует зависимости силы натяжения провода в промежуточном пролете от его удлинения, вызванного воздействием на провод нагрузки от собственного веса провода и веса гололеда, а также закрепление на изоляторах опор грузов, вес которых соответствует весу приложенных к проводу нагрузок, позволило на компактном стенде исследовать работу опор в анкерном участке в расчетных и аварийных режимах в условиях, максимально приближенных к реальным. Отмеченные обстоятельства позволяют уточнить методики расчета опор на основе полученных экспериментальных данных, так как теоретические методы описания сложных динамических процессов, происходящих в воздушных линиях электропередачи с множеством влияющих факторов, имеют ограниченное применение вследствие недостаточно высокой точности расчетов.

Нагружение опор в конце испытаний разгружающей нагрузкой и регистрация основных параметров разрушения конструкций опор позволяют определить предельную расчетную нагрузку и выявить наименее прочные узлы конструкций опоры.

На рис. 1 показана схема стенда для динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи, на рис. 2 – зависимость силы натяжения провода в пролете от его удлинения, вызванного изменением удельных нагрузок от гололеда.

Стенд ИС-2 для динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи включает силовую прямоугольную раму 1, на основании 2 которой установлено не менее трех испытуемых опор 3, моделирующих анкерный участок, в котором боковые стойки 4 рамы 1 представляют собой макеты анкерных опор. На изоляторах 5, установленных на траверсах 6, закреплены тросовые тяги 7 с встроенными в них калиброванными разрывными вставками 8, динамометрами 9 (устройства 8 и 9 показаны только на одной тросовой тяге) и пружинами растяжения 10, представляющими собой упругие эквиваленты

проводов (включая грозозащитный трос), которые закреплены на изоляторах 5 испытываемых опор 3 в реальных промежуточных пролетах. Концы тросовых тяг 7 через блоки 11 соединены с соответствующими лебедками 12, закрепленными на основании 2. На верхней балке 13 рамы 1 установлены датчики перемещения 14, вершин 15 опор 3.

Динамические испытания опор осуществляют следующим образом. Предварительно, для проведения динамических испытаний опор в полном соответствии с реальными условиями, на каждом изоляторе 5 испытываемой опоры 3 закрепляют тарировочный груз (не показан), вес которого равен разности между весом провода в реальном пролете и весом тяги 7 с встроенным в нее калиброванной разрывной вставкой 8, динамометром 9 и пружиной растяжения 10, закрепленной в пролете между двумя опорами 3, установленными на стенде.

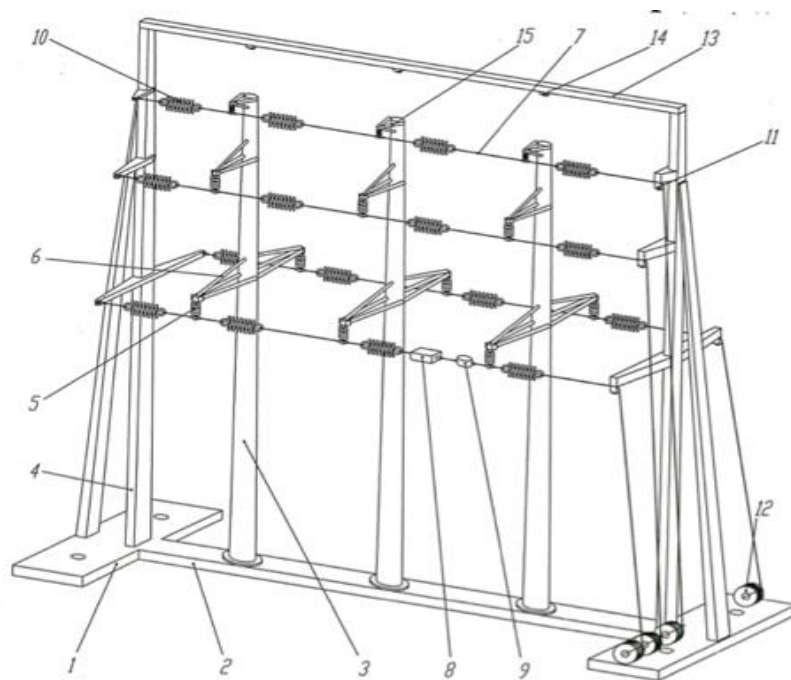


Рис.1. Стенд ИС-2 для динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи

После этого осуществляют контролируемое динамометрами 9 натяжение тросовых тяг 7 с помощью лебедок 12 до разрыва одной из калиброванных вставок 8, рассчитанных на минимальное усилие натяжения тросовой тяги 7, определяемое нагрузкой от собственного веса провода в реальном пролете. При разрыве калиброванной вставки 8 определяют отклик промежуточных опор 3 на реальное импульсное воздействие, соответствующее условиям эксплуатации, а именно обрыв провода в пролете. При этом измеряют амплитуду и частоту собственных колебаний опор 3, соединенных между собой тросовыми тягами 7 с встроенными пружинами растяжения 10, являющимися упругими эквивалентами проводов, с помощью датчиков перемещения 14.

Также тензодатчиками (не показаны) определяют механические напряжения в критических точках конструкций опор 3 в период воздействия на них импульсной нагрузки.

Аналогичным образом осуществляют повторение описанных операций после закрепления на изоляторах 5 дополнительных грузов (не показаны), вес которых соответствует весу гололеда с возрастающими ступенями толщины его стенки, включая её максимальное значение. Учитывая повышение силы натяжения провода в пролете от увеличения дополнительной нагрузки на него от веса гололеда, повышают величину усилия

разрыва калиброванной вставки 8 до значения, соответствующего этой дополнительной нагрузке и собственному весу провода.

После завершения испытаний по моделированию воздействия на провод гололеда с максимальной сверхнормативной толщиной стенки устанавливают величину усилия разрыва калиброванной вставки 8 равной усилию разрыва провода и за счет натяжения тросовой тяги 7 производят разрушение наименее прочной конструкции опоры 3. При этом вследствие редукции тяжения проводов разрушаются конструкции опор 3 в соседних с аварийным пролетах. Также осуществляют регистрацию параметров процесса разрушения конструкций и определяют коэффициенты динамичности опор 3.

На примере ВЛ 110 кВ с многогранными опорами, к которым подвешены сталеалюминиевые провода АС-70, II района гололедности (максимальная толщина стенки гололеда составляет 10 мм), при длине пролета $l=300$ м определим зависимость силы натяжения провода в пролете от его удлинения, вызванного изменением удельных нагрузок от гололеда.

Исходные данные:

- общее сечение провода $S=79,3 \text{ мм}^2$;
- диаметр провода $d=11,4 \text{ мм}$;
- вес 1 км провода 275 кгс;
- максимально допустимое напряжение $\sigma_{\max}=11,6 \text{ кгс/мм}^2$, при максимальной толщине стенки гололеда $c=10 \text{ мм}$ и температуре $t=-5^\circ \text{C}$;
- удельная нагрузка от собственного веса провода $\gamma_0=3,46 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/м} \cdot \text{мм}^2$;
- удельная нагрузка от веса гололеда с толщиной стенки 10 мм
 $\gamma_{r \max} = 7,463 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/м} \cdot \text{мм}^2$;
- удельная нагрузка от веса провода с гололедом

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_{r \max} = 3,46 \cdot 10^{-3} + 7,63 \cdot 10^{-3} = 11,09 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/м} \cdot \text{мм}^2.$$

Механические напряжения в проводе при изменении нагрузок от гололеда определяются из уравнения состояния провода [5]:

$$\sigma - \frac{\gamma^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_0^2}, \quad (1)$$

где $E = 8,25 \cdot 10^3 \text{ кгс/мм}^2$ – модуль упругости провода.

В результате решения уравнения (1) было определено σ_0 – напряжение в проводе, вызванное удельной нагрузкой γ_0 от собственного веса провода, $\sigma_0=4,21 \text{ кгс/мм}^2$, а также напряжение $\sigma_5=7,24 \text{ кгс/мм}^2$ при толщине стенки гололеда 5 мм.

По полученным значениям напряжений в проводе при толщинах стенки гололеда 0; 5 и 10 мм (точки А, В, С на графике) была построена зависимость силы натяжения провода в пролете $P = \sigma \times S$ от его удлинения ΔL , вызванного изменением удельных нагрузок от гололеда (рис. 2). При этом удлинение ΔL определялось по формуле

$$\Delta L = l \cdot \frac{\sigma - \sigma_0}{E},$$

его максимальное значение равно

$$\Delta L_{\max} = l \cdot \frac{\sigma_{\max} - \sigma_0}{E} = 300 \cdot \frac{11,6 - 4,21}{8,25 \cdot 10^3} = 268,727 \text{ мм}.$$

Как следует из графика рис. 2, в точках А, В, С сила натяжения провода в пролете P и удлинение провода ΔL равны, соответственно, $P_A=333,85 \text{ кгс}$, $\Delta L_A=153 \text{ мм}$; $P_B=574,1 \text{ кгс}$, $\Delta L_B=263,27 \text{ мм}$; $P_C=919,88 \text{ кгс}$, $\Delta L_C=421,8 \text{ мм}$. При этом в диапазоне удлинения провода, вызванного воздействием гололеда, равном 268,73 мм, сила натяжения изменяется от 333,85

до 919,88 кгс практически по линейной зависимости. Аналогичным образом, согласно [5], производят расчет грозозащитного троса.

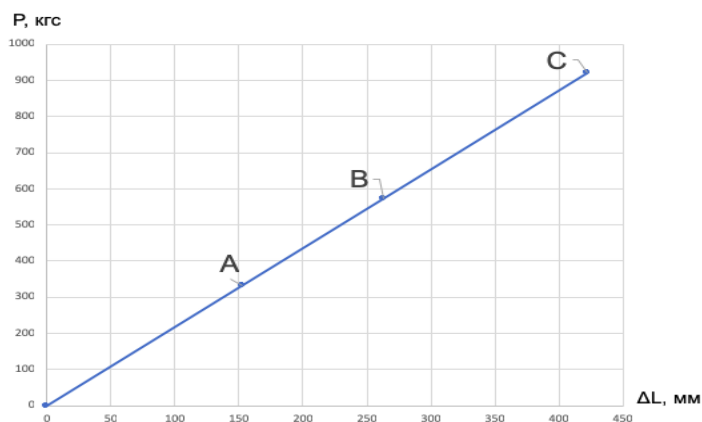


Рис. 2. Зависимость силы натяжения провода в пролете от его удлинения, вызванного изменением удельных нагрузок от гололеда

Так как в предложенном техническом решении провода в реальном пролете заменены их упругими эквивалентами, в качестве которых использованы пружины растяжения, показанная на рис. 2 зависимость является исходной для расчета нагрузочной характеристики пружины.

Расчет размеров и параметров пружины проведен согласно [6]. Параметры рассчитанной пружины представлены в таблице.

Таблица 1

Параметры пружины

Формат расчета усилий	Расчет усилий в кгс
Материал	60С2А, 51ХФА
Диаметр проволоки(прутка), d , мм	14
Наружный диаметр, $D1$, мм	111
Рабочее число витков, n , шт.	12
Предварительное растяжение, $S1$, мм	262
Рабочее растяжение, $S2$, мм	262
Максимальное растяжение, $S3$, мм	268
Количество пружин в партии, шт.	1
Внутренний диаметр зацепа, $D2$, мм	83
Длина пружины по телу, L_0 , мм	182
Длина пружины между зацепами, L , мм	348
Индекс пружины	6,93
Размер открытой части зацепа	35
Жесткость пружины, кг/мм	3,51
Предварительная нагрузка, $F1$, кг	268,33
Рабочая нагрузка, $F2$, кг	919
Максимальная нагрузка, $F3$, кг	940,05
Длина пружины между зацепами при нагрузке $F1$, $L1$, мм	424,5
Длина пружины между зацепами при нагрузке $F2$, $L2$, мм	610
Длина пружины между зацепами при нагрузке $F3$, $L3$, мм	616
Максимальные касательные напряжения, МПа	102,84
Масса пружины, m , кг	5,24862

Выводы

Использование предложенного способа динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи позволит обеспечить динамические испытания единой системы опор, объединенных упругими механическими связями в виде тросовых тяг с встроенными в них пружинами растяжения, наиболее полно моделирующей реальный анкерный участок для определения динамических характеристик опор при имитации реального импульсного воздействия на них, соответствующего условиям эксплуатации, а именно обрыв провода, как в расчетных, так и в аварийных режимах, вызванных воздействием гололедных нагрузок, превышающих предельные значения, включающих разрушение конструкций опор.

Также предложенный способ позволит провести экспериментальные исследования процессов каскадного разрушения анкерного участка вследствие обрыва проводов, когда потенциальная энергия натяжения проводов в пролетах анкерного участка преобразуется в мощное динамическое воздействие на конструкции опор, приводящее к их разрушению.

Литература

1. Пат. 2554285 Российская Федерация, МПК G 01 M 5/00. Способ испытания опор / Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р., Сабитов Л.С.; заявл.01.11.2013; опубл. 27.06.2015. Бюл. №18.
2. Бирбраер А.Н. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 594с. С.106.
3. Пат. 2574419 Российская Федерация, МПК G 01 M 7/02. Способ проведения сейсмических испытаний опор линий электропередач / Пучков С.А., Баринов К.В.; заявл.28.08.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №4.
4. Металлические конструкции, т.3 /Под редакцией В.В. Кузнецова. М.: АСВ, 1999. 528с. С.402.
5. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Л.: Энергия, 1979. 312с.
6. Ачеркан Н.С. Детали машин, т.2. М.:Машиностроение, 1968. 408с.
7. Васылев В.Н., Гаранжа И.М. Методика экспериментальных исследований работы многогранных гнутых стоек (МГС) в опорной зоне опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи // Металлические конструкции. 2010. N1, т. 16. С.51–60.
8. Пат. 2654897 Российская Федерация, МПК G 01 M 5/00. Способ динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи /Сабитов Л.С., Кашапов Н.Ф., Гатиятов И.З., Гильманшин И.Р., Кузнецов И.Л., Киямов И.К., Мезиков А.К.; заявл. 17.08.2017; опубл. 23.05.2018. Бюл. №15.
9. Андреев В.И., Джинчелашвили Г.А., Колесников А.В. Расчет зданий и сооружений на сейсмические воздействия с учетом нелинейных эффектов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. No 7. С. 33–35.
10. Гутников В.А., Сетуха А.В. Моделирование сочетания сейсмических и ветровых нагрузок при проектировании высотных зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. No 4. С. 24–31.
11. Radchenko A.V. Destruction of concrete beams with metal and composite reinforcement under impulse action / A.V. Radchenko, P.A. Radchenko, S.P. Batuev, V.S. Plevkov, D.G. Utkin // Journal of Physics : conference series. 2015. Vol. 653. –012047. 7 p. – DOI : 10.1088/1742-6596/653/1/012047. – 0,81 / 0,16 п.л.
12. Radchenko P.A. Numerical simulation of deformation and fracture of space protective shell structures from concrete and fiber concrete under pulse loading / P.A. Radchenko, S.P. Batuev, A.V. Radchenko, V.S. Plevkov // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. – 012048. 9 p. – DOI : 10.1088/1742-6596/653/1/012048. – 1,04 / 0,26 п.л.
13. Сапожников А.И. Адекватные расчетные модели зданий и сооружений – гарантия их сейсмостойкости // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. No 6. С. 38–43.

Авторы публикации

Гатиятов Ильнур Зиннурович – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» (ЭТКС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сабитов Линар Салихзанович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ); доцент Казанского (Приволжского) федерального университета.

Гильманин Искандер Рафаилович – к.т.н., доцент кафедры технической физики и энергетики Казанского (Приволжского) федерального университета; доцент кафедры электрооборудования КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева.

Кашапов Наиль Фаикович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технической физики и энергетики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Киямов Ильгам Киямович – д.э.н., профессор кафедры биомедицинский инженерии и управления инновациями Казанского (Приволжского) федерального университета.

References

1. Patent №2554285 RU, MPK G 01 M 5/00. Appl. 01.11.2013; publ. 27.06.2015. Byul. No.18.
2. Birbraer A.N. Extreme effects on buildings. SPb.: Publishing house of the Polytechnic University, 2009. 594c., P. 106.
3. Patent №2574419 RU, MPK G 01 M 7/02. Appl. 28.08.2014; publ. 10.02.2016. Byul. No.4.
4. Metal structures, vol. 3 / edited by V.V. Kuznetsov. M.: ASV, 1999. 528c. S. 402.
5. Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P. Designs and mechanical calculation of power lines. L.: Energy, 1979. 312c.
6. Acherkan N.S. Machine parts, t. 2. M.: - engineering, 1968. 408 PP.
7. Vasilev V.N., Garanga I.M. Methodology of experimental research work is multi-faceted roll-formed racks (MGS) in the support area of the supports of air-lines (VL) transmission // Journal "Metal constructions". 2010. N1, VOLUME 16 (2010) 51–60.
8. Patent 2654897 RU, IPC G 01 M 5/00. Method of dynamic tests of supports of overhead power lines /Sabitov H.P., Khashapov N.F., Gatiyatov Z.I., Gil'manshin I.R., Kuznetsov I.L., Kiyamov I.K., Mesikov A.K.; Appl. 17.08.2017; publ. 23.05.2018, Byul. No.15.
9. Andreev V.I., Jinchvelashvili G.A., Kolesnikov A.V. Calculation of buildings and structures on seismic effects taking into account nonlinear effects // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2012. No. 7. P. 33–35.
10. Gutnikov V.A., Setukha A.V. Modeling of combination of seismic and wind loads in the design of high-rise buildings-earthquake.// Resistant construction. Safety of structures. 2013. No. 4. P. 24–31.
11. Radchenko A.V. Destruction of concrete beams with metal and composite reinforcement under impulse action / A.V. Radchenko, P.A. Radchenko, S.P. Batuev, V.S. Plevkov, D.G. Utkin // Journal of Physics : conference series. 2015. Vol. 653. -012047. 7 p. - DOI : 10.1088/1742-6596/653/1/012047. - 0.81 / 0.16 p. l.
12. Radchenko P.A. Numerical simulation of deformation and fraction of space protective shell structures from concrete and fiber concrete under pulse load - ing / P.A. Radchenko, S.P. Batuev, A.V. Radchenko, V.S. Plevkov // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. 012048. 9 p. - DOI : 10.1088/1742-6596/653/1/012048. - 1.04 / 0.26 p. l/
13. Sapozhnikov A.I. Adequate design models of buildings and structures – a guarantee of their seismic resistance // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. 2013. No. 6. P. 38–43.

Authors of the publication

Ilnur Z. Gatiyatov – senior lecturer ,Department "Electrotechnical complexes and systems", Kazan state power emerging University.

Linar S. Sabitov – PhD, associate Professor, associate Professor ,Department Of "energy supply of enterprises and energy saving technologies", Kazan state energy University, associate Professor Kazan Federal University.

Iskander R. Gilmanshin – Associate Professor, department of Technical physics and Energetics of Kazan Federal University, Associate Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Nail F. Khashapov – Doc. Sci. (Techn.), Professor, head Department of technical physics and energy, Kazan Federal University.

Ilgam K. Kiyomov – Doc. Sci. (Techn.), Professor, Department of biomedical engineering and innovation management, Kazan Federal University.

Поступила в редакцию

29 июня 2018 г.



**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

М.Ф. Садыков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В настоящее время тестирование и настройка электронных систем управления двигателем является длительным и трудоёмким процессом, так как необходимо выполнение всех требований по безопасности, обеспечение мощностных, экологических параметров и топливной экономичности разрабатываемых ДВС. В статье описана многофункциональная автоматизированная установка для настройки электронной системы управления, для ускорения калибровки и модификации алгоритмов электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания, отработки реакций на возникающие неисправности.

Ключевые слова: автоматизированная многофункциональная установка, устройства для контроля технического состояния двигателя, двигатель внутреннего сгорания, электронная система управления, свободный выкат двигателя, газораспределительный механизм.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-138-145

Для цитирования: Садыков М.Ф. Автоматизированная многофункциональная установка для исследования, разработки и тестирования двигателя внутреннего сгорания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 138-145. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-138-145.

**AUTOMATED MULTIFUNCTIONAL INSTALLATION
FOR THE RESEARCH, DEVELOPMENT AND TESTING
OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

M.F.Sadykov

Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan

Abstract: At present, testing and tuning of electronic engine control systems is a long and laborious process, since it is necessary to fulfill all safety requirements, ensure power and environmental parameters and fuel efficiency of the engine being developed. The article describes a multifunctional automated installation for tuning up an electronic control system, speeding up the calibration and modification of algorithms for electronic control systems of an internal combustion engine, and to work off reactions to occurring malfunctions.

Keywords: automated multifunctional installation, devices for monitoring the technical condition of the engine, internal combustion engine, electronic control system, free roll out of the engine, gas distribution mechanism.

For citation: M.F. Sadykov Automated multifunctional installation for the research, development and testing of internal combustion engine // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 138-145.* DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-138-145.

Введение

Ужесточение требований к выбросам вредных веществ и улучшению экономичности двигателей внутреннего сгорания вынуждает производителей совершенствовать электронные системы управления двигателем (ЭСУД) и создавать более совершенные алгоритмы управления. В настоящее время создание новых электронных блоков управления (ЭБУ) или улучшенных алгоритмов управления основано на принципе моделирования разрабатываемого двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Тестирование и настройка электронных систем управления двигателем является трудоёмким и длительным процессом, так как необходимо выполнение всех требований по безопасности, обеспечение экологических, мощностных показателей и экономичности расхода топлива разрабатываемых ДВС.

Проверка электронных систем управления должна быть выполнена при всех рабочих режимах двигателя: при предельных температурах, давлении окружающей среды с учетом влияния неисправных элементов на работоспособность системы. Для предварительной проверки ЭСУД целесообразно использовать специальные аппаратно-программные комплексы (АПК), которые способны проводить испытания, настройку, калибровку датчиков и блоков ДВС в рабочих режимах без использования стендовых или натурных исследований. Такой АПК при разработке новых функциональных и конструктивных решений должен иметь возможность проведения научно-исследовательских работ, например, системы управления фазами газораспределения.

В работе проведен анализ методов, повышающих возможности бортовой диагностики ЭСУД в области оценки его рабочего состояния [1]. Был разработан метод диагностики, который использует информацию только со штатных датчиков ДВС. Предложены алгоритмы анализа данных, которые можно разместить в программе ЭБУ. В качестве сопутствующей задачи построена модель ДВС, адекватно отражающая работу последнего во время проведения диагностического испытания.

Зная изменение механического состояния ДВС во времени, используя стандартные методы статистики, можно прогнозировать остаточный ресурс как ДВС в целом, так и срока ближайшего технического обслуживания. Более того, зная механические параметры, можно проводить оценку состояния картриджей фильтрующих элементов и смазочных материалов. В целом это повысит точность прогнозов и даст заметный экономический эффект, так как своевременное прохождение технического обслуживания продлит ресурс двигателя, а замена, при необходимости, горюче-смазочных материалов – позволит экономить на их потреблении.

С целью реализации всех перечисленных возможностей была предложена концепция нового диагностического метода и разработана автоматизированная многофункциональная установка (АМУ) для тестирования и эмуляции работы ДВС и ЭБУ.

Разработка АМУ

Разработанная АМУ состоит из трех частей: диагностической, эмулирующей и управляющей (рис.1) [2,3].

Представленная на рис. 2 АМУ обеспечивает работу в следующих основных режимах:

1. Режим полной программной эмуляции. Связь блоков обозначена «1».
2. Режим настройки электронных блоков управления. Связь блоков обозначена «2».

3. Режим разработки и проверки алгоритмов управления. Связь блоков обозначена «3».

4. Режим испытания и тестирования реального ЭБУ на работу с реальным ДВС. Связь блоков обозначена «4».

5. Режим испытания исполнительных механизмов и датчиков. Связь блоков обозначена «1, 2, 3, 5».

В состав программного комплекса АМУ для диагностики технического состояния ДВС входит несколько измерительных блоков, реализующих различные алгоритмы сбора информации, накопления, предварительной обработки массивов данных, а также их последующей визуализации. Реализована возможность установки «запредельных» значений датчиков в ручном режиме, эмуляции обрыва или короткого замыкания в цепях датчиков и исполнительных механизмов.

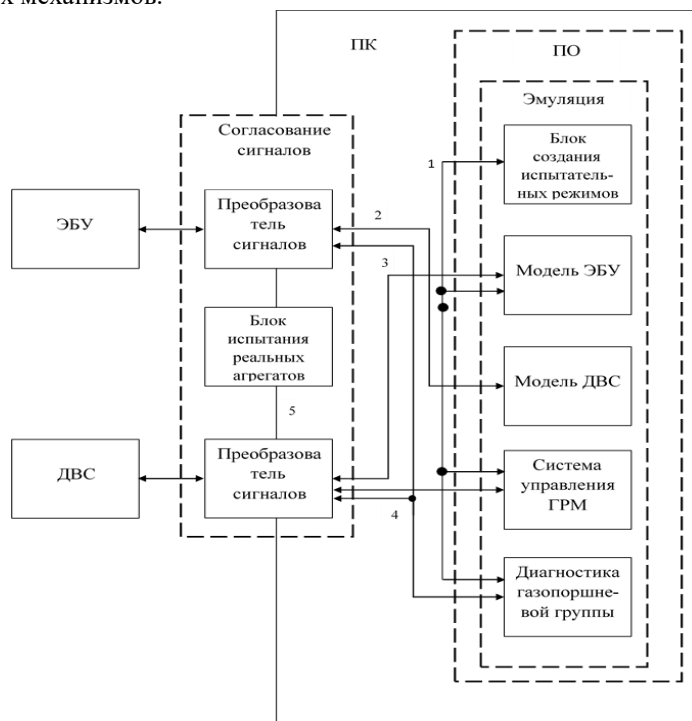


Рис.1. Блок-схема АМУ

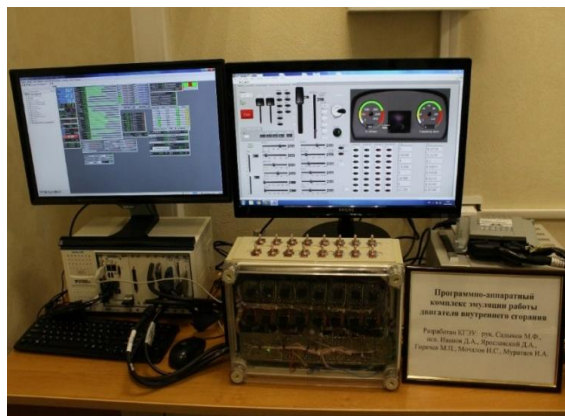


Рис.2. Внешний вид основных узлов экспериментальной установки

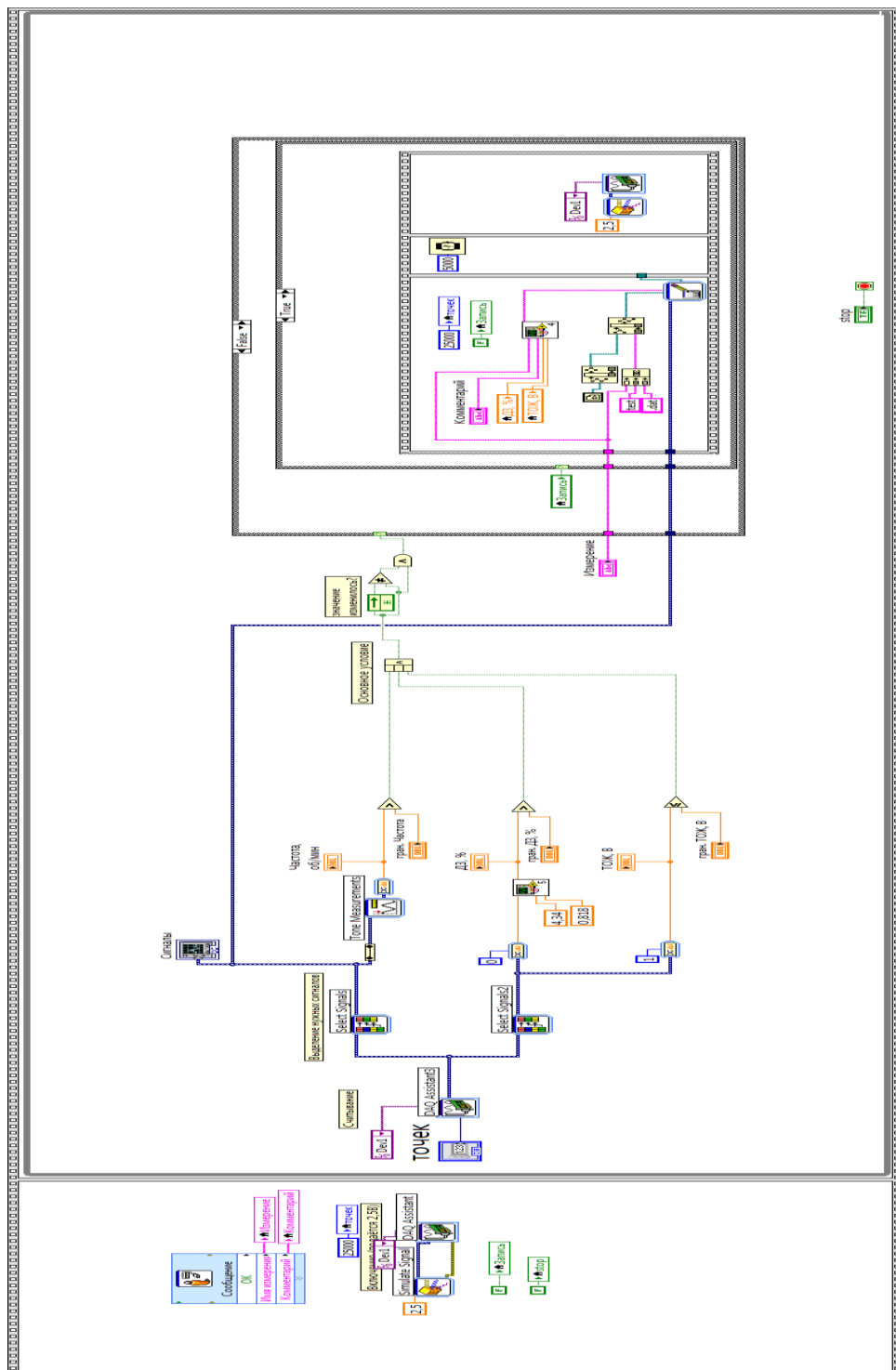


Рис. 3. Блок-диаграмма программы сбора информации, накопления и предварительной обработки массивов данных, а также их дальнейшей визуализации

Исследования и основные результаты, полученные на АМУ

Разработана математическая модель работы ДВС [6], в которую введены коэффициенты «утечки», являющиеся показателями потерь объема воздуха в цикле сжатия для каждого цилиндра. Используя данную модель, был проведен численный эксперимент – расчет свободного выката для двигателя автомобиля ВАЗ-21114. (рис. 4).

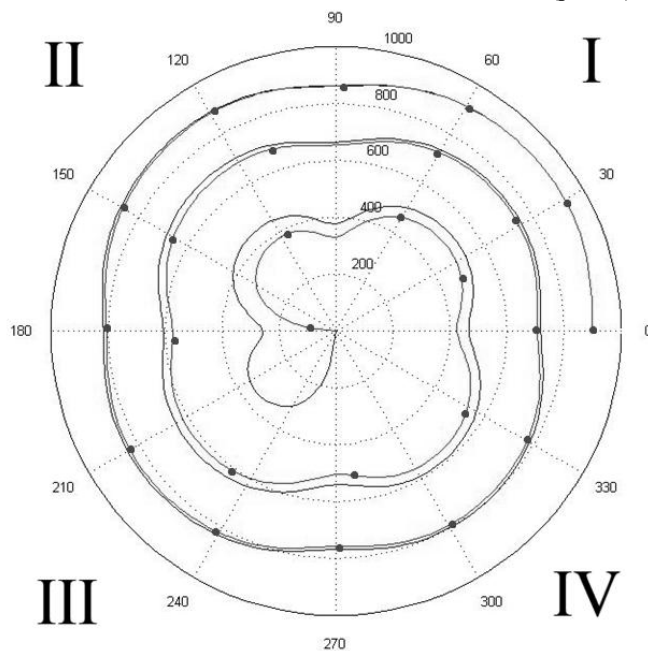


Рис. 4. Свободный выкат двигателя с равномерной поцилиндровой утечкой (кривая без точек) и двигателя с поврежденным вторым цилиндром

Начальная скорость коленчатого вала двигателя принималась равной 900 об/мин. Для визуализации модельного эксперимента мы применили построенные в полярных координатах диаграммы (рис. 4). Угловая координата на диаграмме соответствует угловому положению газораспределительного вала, по текущему положению радиус-вектора откладывается мгновенная частота вращения коленчатого вала.

Кривой без точек показан численный эксперимент свободного выката исправного двигателя с равномерными коэффициентами утечки, кривой с точками – выкат двигателя с повышенным износом цилиндро-поршневой группы во втором цилиндре, оставшиеся цилиндры без износа.

Из графика можно сделать вывод о влиянии коэффициента утечки на изменение скорости коленчатого вала. При значительной утечке происходит заметное снижение скорости.

На основе метода свободного выката был предложен улучшенный алгоритм неразрушающей диагностики технического состояния двигателя внутреннего сгорания.

В работе диагностировались шесть ДВС «ВАЗ-21114». Данный двигатель выбирался из соображений доступности. В качестве начальной скорости выбрана величина 1550 об./мин., в качестве рабочей температуры – 90°C. На одном и том же двигателе эксперимент повторялся не менее пяти раз. Сигналы с датчиков положения дроссельной заслонки, положения коленчатого вала, массового расхода воздуха, температуры охлаждающей жидкости, положения распределительного вала, и датчика концентрации кислорода записывались с частотой дискретизации 100 кГц. Единственным датчиком, показания которого влияли на точность эксперимента, является датчик положения коленчатого вала. Его угловая погрешность составляет $\pm 0,5^\circ$, погрешность дискретизации

при выбранной нами частоте последней и скорости вращения коленчатого вала пренебрежимо мала. Сравнение данных одного из экспериментов с моделью показано на рис.5.

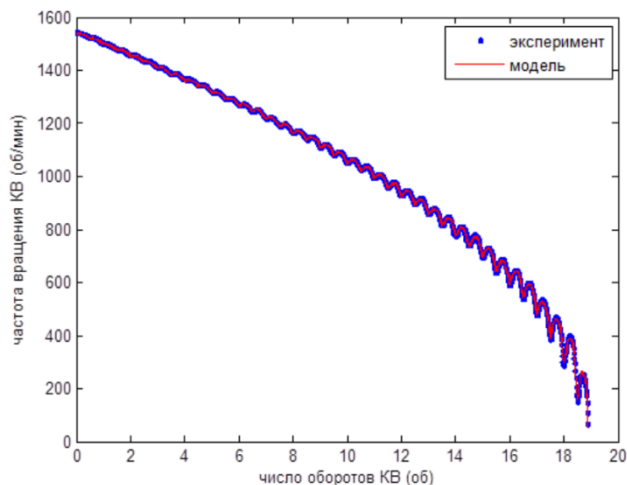


Рис.5. Сравнение экспериментальных и данных по предложенной модели

Из анализа результатов эксперимента можно сделать вывод, что модель в данных условиях (диапазон частот вращения, положение датчика заслонки) ведет себя адекватно.

Все испытуемые двигатели после диагностики предложенным методом диагностировались традиционным методом – путем замера компрессии по цилиндрам. Вращение осуществлялось стартером при полностью заряженной аккумуляторной батарее и температуре охлаждающей жидкости 90°C.

Для испытаний электрогидроприводного газораспределительного механизма (ГРМ) был использован двигатель КамАЗ семейства 740.70, установленный на стенде научно-технического центра ПАО «КамАЗ» (рис.6) [7,8]. На двигателе установлены штатные датчики положения коленчатого и распределительного вала. В поддоне расположен датчик температуры масла. Для снижения механических потерь при прокрутке двигателя электромашиной удалены верхние поршневые кольца, впускные коллекторы и система отвода отработавших газов. В исследовании рассматривается влияние характеристик управляющего электрического сигнала электронного блока управления на движение клапанов двигателя внутреннего сгорания с ГРМ.



Рис. 6. Фотография исследовательского стенда

Результаты испытаний показали возможность управления фазами газораспределения и подъемом клапанов при помощи электрогидравлического привода ГРМ, электрогидравлический привод ГРМ работоспособен при $n = 800 - 2200$ об/мин.

Выводы

Разработанная и созданная в работе автоматизированная многофункциональная установка для тестирования и эмуляции работы ДВС и ЭБУ [9] с применением разработанной методики оценки механического состояния ДВС позволяет:

- сократить время и затраты на разработку и отладку новых систем и механизмов ДВС;
- повысить производительность труда инженера и сократить затраты на отладку алгоритмов, настройку и калибровку программного обеспечения, адаптацию компонентов электронной системы управления двигателем и автомобилем [10];
- проводить настройку и испытания систем бортовой диагностики;
- проводить эксперименты по изучению поведения ЭСУД в условиях отказов элементов системы, работы по настройке автомобильных функций;
- проводить научно-исследовательские работы над ДВС и ЭБУ;
- сократить время и затраты на подготовку высоко квалифицированных специалистов.

Литература

1. Садыков М.Ф., Гараев В.М., Ярославский Д.А., Муратаев И.А., Гайнутдинов А.Р. Анализ современных подходов ускорения разработки электронных блоков управления двигателями внутреннего сгорания // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2-2. С. 52–55.
2. Устройство тестирования электронного блока управления двигателем внутреннего сгорания: пат. 154816 Российская Федерация: МПК G 06 G 7/00. / Садыков М.Ф., Муратаев И.А., Ярославский Д.А., Гайнутдинов А.Р., Гараев В.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "КГЭУ". – № 2014145064/08; заявл. 06.11.2014; опублик. 10.09.2015, Бюл. № 25. 10 с.
3. Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В., Андреев Н.К. Применение в системах автопилотирования транспорта аппаратно-программных комплексов эмуляции двигателя и трансмиссии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018 №5-6. С.67–74.
4. Программа эмулятора двигателя внутреннего сгорания с графическим программированием: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611795. Российская Федерация. / М.Ф. Садыков, И.А. Муратаев, Р.Р. Закиева, А.Р. Гайнутдинов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "КГЭУ". – № 2013661602; заявл. 12.12.2013; опублик. 20.03.2014.
5. Садыков М.Ф., Гараев В.М., Ярославский Д.А., Муратаев И.А., Гайнутдинов А.Р. Аппаратно-программный эмулятор ДВС с графическим программированием алгоритма // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 6. С. 293–294.
6. Садыков М.Ф., Муратаев И.А., Ярославский Д.А., Гайнутдинов А.Р., Закиева Р.Р. Диагностика состояния ДВС по параметрам механических потерь // Энергетика Татарстана. 2014. № 3-4 (35-36). С. 65–68.
7. Березовский, А.Б. Максимов А.В., Садыков М.Ф. Исследование влияния характеристик сигнала электронного блока управления на работу гидроприводного газораспределительного механизма // Actualscience. 2015. Т. 1, № 3 (3). С. 68–69.
8. Березовский А.Б., Максимов А.В., Гатауллин Н.А., Зимина Л.А., Садыков М.Ф., Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х. Экспериментальное исследование газораспределительного механизма с электрогидравлическим приводом // Двигателестроение. 2016. № 1. С. 11–17.
9. Sadykov M., Kuchev S.M., Murataev I., Yaroslavskiy D. KAMAZ engine emulation system for electronic control system testing // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10, № 24. С. 45228–45131.

10. Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Гайнутдинов А.Р., Садыков М.Ф. Выбор операционной системы реального времени для беспроводного устройства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2016. Т. 72, № 4. С. 95–100.

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. Sadykov M.F., Garayev V.M., Yaroslavsky D.A., Murataev I.A., Gainutdinov A.R. Analysis of modern approaches to accelerate the development of electronic control units of internal combustion engines // Herald of Kazan state technical University. 2013. № 2-2. С. 52–55 (In Russian).
2. Testing device for electronic control unit of internal combustion engine: pat. 154816 RU / Sadykov M.F., Murataev I.A., Yaroslavsky D.A., Gainutdinov A.R., Garayev V.M.; KSPEU – № 2014145064/08; pub. 10.09.2015. 10 p.
3. Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Andreev N.K. The use in the systems of auto-pilot transport of software and hardware emulation engine and transmission // Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2018 №5-6. P.67–74.
4. Program emulator of an internal combustion engine with a graphical programming: pat. 2014611795 RU / Sadykov M. F., Murataev I. A. Zakieva R. R., Gainutdinov A. R.; KSPEU. – № 2013661602; pub. 20.03.2014.
5. Sadykov M.F., Garayev V.M., Yaroslavsky D.A., Murataev I.A., Gainutdinov A.R. Hardware-software emulator of internal combustion engine with graphic programming of the algorithm // Herald of Kazan Technological University. 2014. V. 17, № 6. P. 293–294.
6. Sadykov M.F., Murtaev I.A., Yaroslavsky D.A., Gainutdinov A.R., Zakieva R.R. Diagnostics of the condition of the internal combustion engine in the parameters of mechanical losses // Energy Of Tatarstan. 2014. № 3-4 (35-36). P. 65–68.
7. Berezovsky A.B., A. Maksimov V.A., Sadykov M.F. Study of the influence of the electronic control unit signal characteristics on the operation of the hydraulic gas distribution mechanism // Actualscience. 2015. V. 1, № 3 (3). P. 68–69.
8. Berezovsky A.B., Maksimov A.V., Gataullin N.A. Zimina L.A., Sadykov M. F., Gumerov I.F., Valeev D.Kh. Experimental study of gas distribution mechanism with electrohydraulic drive // Dvigatelsestroyeniye. 2016. № 1. P. 11–17.
9. Sadykov M., Kuchev S.M., Murataev I., Yaroslavskiy D. KAMAZ engine emulation system for electronic control system testing // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. V. 10, № 24. P. 45228–45131.
10. Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Goryachev M.P., Gaynutdinov A.R., Sadykov M.F. Selection of real time operating system for wireless device // Bulletin of Kazan State Technical University named after. A.N. Tupolev. 2016. V. 72, № 4. P. 95–100.

Author of the publication

Marat F. Sadykov – PhD (physical&mathematical) sci., Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical bases of electrical engineering», Kazan State Power Engineering University (KSPEU). E-mail: sadykov@kgeu.ru.

Поступила в редакцию

05 июля 2018 г.

ФИЗИКА



УДК 66.021.3/4

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА С ЦЕЛЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

И.И. Шарипов¹, Л.В. Круглов¹, В.И. Круглов¹, О.С. Дмитриева²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

ranli@rambler.ru, tot_kgeu@mail.ru, ja_deva@mail.ru.

Резюме: В статье авторами представлена конструкция контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке, способствующей увеличению удельной площади контакта жидкой и газовой фазы с целью интенсификации процесса теплообмена в колонных аппаратах, схема экспериментальной установки, методика проведения эксперимента, полученные результаты проведенных экспериментов и выводы по работе. Эксперименты продемонстрировали влияние геометрических параметров рабочего участка (ширина рабочего участка, высота рабочего участка, радиус загиба рабочего участка) искусственной неровности перегородки контактного устройства на площадь растекания пленки и на отклонение жидкости от оси рабочего участка. Показано наиболее эффективное соотношение диаметра стока жидкости к ширине рабочего участка и влияние высоты рабочего участка на эффективность предложенной конструкции струйно-плёночного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке.

Ключевые слова: колонные устройства, массообменные процессы, струйно-плёночное течение, искусственные неровности, контактные устройства.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-146-153

Для цитирования: Шарипов И.И., Круглов Л.В., Круглов В.И., Дмитриева О.С. Разработка конструкции струйно-плёночного контактного устройства с целью интенсификации теплообмена // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. Т. 20. № 9-10. С. 146-153. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-146-153.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THE-JET FILM CONTACT DEVICE CONSTRUCTION FOR INTENSIFICATION OF HEAT MASS EXCHANGE

I.I. Sharipov¹, L.V. Kruglov¹, V.I. Kruglov¹, O.S. Dmitrieva²

¹Kazan State Power engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
ranli@rambler.ru, , ja_deva@mail.ru, tot_kgeu@mail.ru.

Abstract: In the article the authors presented the construction of a contact device with an artificial unevenness on a vertical partition, which contributes to an increase in the specific contact area of the liquid and gas phases, in order to intensify the heat-storage process in the column apparatus, the experimental setup, the experimental procedure, the results of the experiments and the conclusions on the work. The experiments demonstrated the effect of the geometric parameters of the working section (width of the working area, height of the working area, bending radius of the working section) of the artificial unevenness of the partition of the contact device on the spreading area of the film and on the deviation of the liquid from the axis of the edge of the working section. The most effective ratio of the diameter of the drain of the liquid to the width of the working section is shown and the influence of the height of the working area on the efficiency of the proposed design of a jet-film contact device with an artificial unevenness on a vertical partition.

Key words: column devices, mass exchange processes, jet-film flow, artificial irregularities, contact devices.

For citation: I.I. Sharipov, L.V. Kruglov, V.I. Kruglov, O.S. Dmitrieva Development of the structure of the-jet film contact device construction for intensification of heat mass exchange // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS vol. 20. № 9-10. pp. 146-153. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-146-153.

Введение

Процессы тепло- и массообмена, применяемые в различных циклах производства в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также в энергетике, на сегодняшний день являются энергетически затратными и экономически не рентабельны. В связи с программой энерго- ресурсосбережения правительства РФ [1] проблема интенсификации тепломассообменных процессов в колонных устройствах на сегодняшний день имеет большое значение. Основное внимание при разработке различных видов колонных массообменных аппаратов уделяется созданию условий эффективного взаимодействия жидкой и газовой фаз.

Одно из направлений интенсификации процесса связано с разработкой новых конструкций контактных устройств [2–6], которые должны обладать развитой поверхностью контакта фаз, высокой сепарационной способностью и относительно невысоким гидравлическим сопротивлением.

В современной литературе представлено множество исследований по взаимодействию газа и жидкости [7–20], однако представленные конструкции устройств обладают относительно малой площадью растекания жидкой фазы вдоль его боковой поверхности, вследствие чего необходим новый подход к созданию его оптимальных конструкций. Большинство проблем современных контактных устройств связано со сложностью создания равномерно стекающих пленок жидкости.

Одним из конструкционных решений является разработка струйно-пленочных контактных устройств с развитой поверхностью, способствующих повышению удельной площади контакта жидкой и газовой фаз в колонных аппаратах. Они работают следующим образом: жидкость стекает сверху вниз, попадая в сливные стаканы. В них она вовлекает внутрь сливных стаканов поток газа, который находится там в виде пузырей. С поверхности жидкости газ срывает капли, которые за счет действия центробежной силы возвращаются обратно. Благодаря этому возникает интенсивное взаимодействие газожидкостных потоков с очень малым временем обновления поверхности. Кроме того, возникающая за счет особенностей конструкции струйно-пленочных контактных устройств центробежная сила обеспечивает надежную сепарацию жидкости после контакта.

Описание устройства

При всех достоинствах предлагаемого устройства имеется потенциал увеличения эффективности за счет создания дополнительной зоны контакта. Например, можно отогнуть элемент от стенки сливного стакана. Это позволит организовать растекание жидкости по боковой стенке, что повысит не только площадь поверхности контакта, но и диапазон устойчивой работы. Авторы статьи предлагают конструкцию струйно-пленочного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке (рис. 1). Искусственная неровность представляет собой прямоугольник с высотой h шириной l , отогнутый на 90° и закрученный под определенным радиусом R .

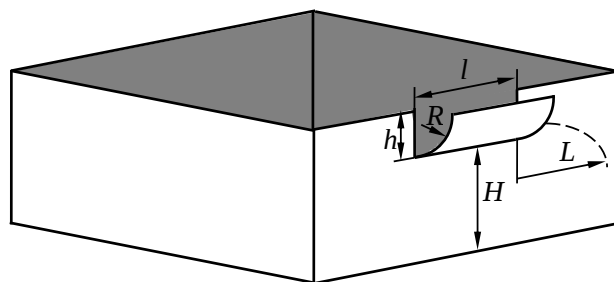


Рис. 1. Контактное устройство с рабочим участком:

H – высота участка стекания жидкости; L – ширина отклонения жидкости; l – ширина рабочего участка; h – высота рабочего участка; R – радиус загиба рабочего участка

С целью исследования влияния геометрических параметров рабочего участка контактного устройства (при $h=10$ и 15 мм, $l=5$; 10 и 15 мм, $R=5$ мм) на растекание жидкости вдоль поверхности вертикальной перегородки была разработана экспериментальная установка (рис. 2).

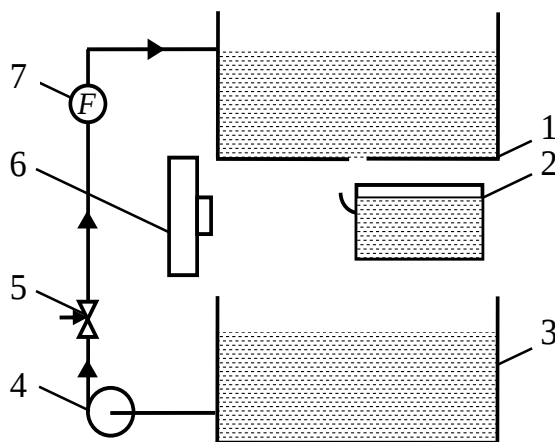


Рис. 2. Аппарат со струйно-пленочным контактным устройством:

1 – емкость для слива жидкости; 2 – контактное устройство с рабочим участком; 3 – емкость для сбора жидкости; 4 – насос для прокачки жидкости; 5 – клапан; 6 – цифровой фотоаппарат; 7 – расходомер

Для исследования течения воды по твердой поверхности был использован метод фото- и видеофиксации. Установка состоит из двух емкостей: для слива 1 (с отверстием $D=10$ мм) и сбора жидкости 3; контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке 2; насоса 4 фирмы OASIS CRP 15/9 для закачки жидкости в емкость 1. Регулирующий клапан 5 необходим для управления расходом жидкости, а расходомер 7 фирмы LOUCHEN ZM FS300A G3/4", с погрешностью $\pm 5\%$, – для учета

расхода воды. Фотофиксация эксперимента проводилась цифровым фотоаппаратом 6 *Nikon D3100 kit18-55*.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов исследований

Вода, вытекающая из отверстия $D=10$ мм емкости 1 со скоростью $w_{\text{воды}}=0,22$ м/с, стекала по месту сгиба рабочего участка контактного устройства в емкость для сбора жидкости 3. Характер растекания воды по поверхности перегородки контактного устройства был зафиксирован фотоаппаратом с функцией серийной съемки 3 кадр/с, фокусным расстоянием 40 мм с погрешностью $\pm 15\%$.

Полученные фотоматериалы оцифровались с помощью компьютерного приложения *GetData Graph Digitizer* с последующим переводом полученных результатов в формат *MS Excel*.

На основании полученных результатов построены графики. В связи с тем, что растекание жидкости происходило в основном симметрично, результаты исследований представлены по правой части от рабочего участка пластины. Было обнаружено, что наибольшая площадь растекания пленки шириной, в среднем, 10–12 мм наблюдается на расстоянии 10–20 мм по высоте участка стекания (рис. 3–5).

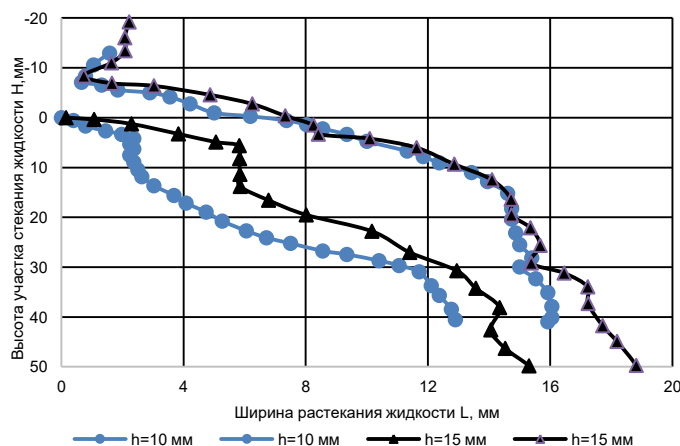


Рис. 3. Площадь растекания пленки при $l=5$ мм

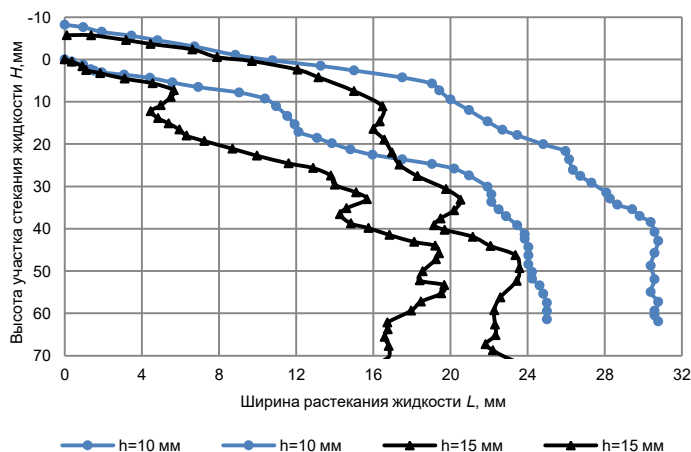


Рис. 4. Площадь растекания пленки при $l=10$ мм

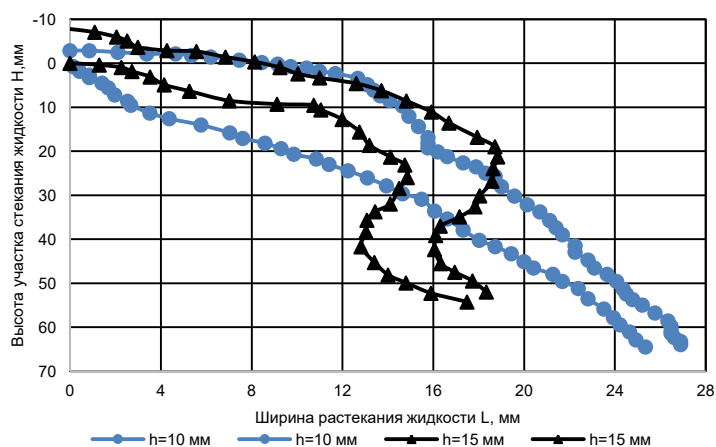


Рис. 5. Площадь растекания пленки при $l=15$ мм

На рис. 6 показана зависимость отклонения жидкости от оси рабочего участка при различной ширине рабочего участка l . Наименьшее значение отклонения получено при $l=5$ мм, связано с тем, что диаметр стекающей струи жидкости в 2 раза больше ширины горизонтального уступа искусственной неровности, которая не оказывает существенного влияния на основную часть потока, причем значения отклонения практически одинаковы для обоих случаев: как при $h=10$ мм, так и при $h=15$ мм. Дальнейшее увеличение ширины рабочего участка ($l=10$ мм) показало увеличение отклонения: в случае с $h=10$ мм практически в 2 раза, а с $h=15$ мм только в 1,3 раза. В третьей точке эксперимента при $l=15$ мм отклонения уменьшились в 1,2 раза для обоих случаев. Данное снижение можно объяснить соотношением D/l : так при более широкой ширине уступа относительно диаметра стекающей струи жидкости основная ее часть стекает во внутреннюю часть контактного устройства. Также необходимо отметить, что при $l=10$ и 15 мм наблюдается общая закономерность, заключающаяся в том, что отклонение при $h=10$ мм в 1,3 раза больше, чем при $h=15$ мм, что связано с уменьшением угла обтекания рабочего участка.

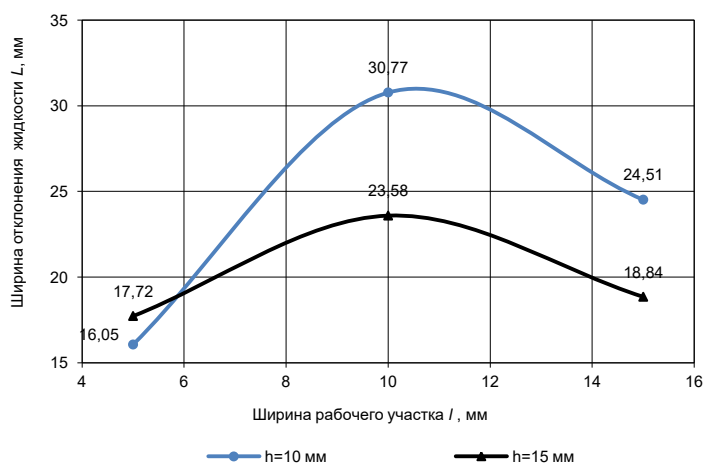


Рис. 6. Зависимость L от l

Проведенные исследования продемонстрировали для данной конструкции струйно-пленочного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной

перегородке, что наибольшая площадь растекания пленки наблюдается на расстоянии 10 – 20 мм по высоте участка стекания. На отклонение жидкости от оси края рабочего участка большое значение имеет отношение D к l : так наиболее эффективным является отношение 1:1. Увеличение высоты рабочего участка h приводит к уменьшению угла отклонения при обтекании горизонтального уступа искусственной неровности, что приводит к снижению его эффективности.

Вывод

Таким образом, предложенная конструкция контактного устройства позволяет существенно увеличить удельную площадь контакта жидкой и газовой фаз на боковых стенках струйно-пленочных контактных устройств, без увеличения его металлоемкости и экономических затрат. Реализация данного конструктивного решения позволит повысить производительность теплообменного оборудования без увеличения его габаритов или уменьшить удельные энергетические затраты, что приведет к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-38-60081 мол_а_дк).

Литература

1. Федеральный закон от 23.11.09 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».
2. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Assessment of change in torque of stream-bubble contact mass transfer devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Т. 51, № 5. С. 383–387.
3. Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. Исследование зависимости гидравлического сопротивления насадочного слоя колонного оборудования // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49, № 12. С. 109–110.
4. Пушнов А.С., Каган А.М., Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2011. 135 с.
5. Пат. 2461406 Российская Федерация, МПК B01D 3/28 (2006.01). Массообменное контактное устройство для взаимодействия жидкости и газа / Григорян Л.Г., Игнатенков Ю.И., Лесухин С.П. № 2010147693; заявл. 22.11.2010; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.
6. Лесухин М.С., Григорян Л.Г. Создание конденсатора нового типа на базе аппарата с вертикальными контактными решетками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 2 (38). С. 206–209.
7. Karwa N., Schmidt L., Stephan P., International Journal of Heat and Mass Transfer. № 55 (13-14) (2012).
8. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. Теплообменный аппарат с комбинированной схемой взаимодействия потоков газа и жидкости в системах обратного водоснабжения // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 11. С. 146–148.
9. Зиганшин М.Г., Ежов П.В., Дмитриев А.В. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа // Промышленная энергетика. 2008. № 9. С. 49–53.
10. Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В. Перспективы использования абсорбентов на основе третичных аминов для повышения эффективности очистки газов в аппаратах высокой пропускной способности // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 3. С. 143–145.
11. Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. Производство и применение водорода / И.Р. Калимуллин, А.В. Дмитриев, Н.А. Николаев. Казань: Российская акад. наук, Казанский науч. центр «Исследовательский центр проблем энергетики», 2008.
12. Макушева О.С., Дмитриев А.В. Оценка экономического эффекта от внедрения контактных устройств с увеличенной пропускной способностью // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 8. С. 355–357.

13. Исаев А.А., Сабанаев И.А., Дмитриев А.В. Разработка лабораторной установки по специальности «Промышленная теплоэнергетика» // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 18. С. 237–239.

15. Жумаев К.К., Аслонов С.Ш., Тухтаев Б.О. Применение регулярных насадок в контактных теплообменниках // Вопросы науки и образования. 2017. № 2. С. 28–29.

16. Moran K., Inumaru J., Kawaji M., International Journal of Multiphase Flow, № 28 (5), (2002).

17. Moshtari, E.G. Babakhani, J.S. Moghaddas, Petroleum & Coal, № 51 (1), (2009).

18. Крючков Д.А., Григорян Л.Г. Испарительное охлаждение в трёхпоточных аппаратах с вертикальными контактными решётками // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. № 2. С. 40–43.

19. Kholpanov L.P. Self-organization and dynamic chaos in chemical-technology and heat-exchange devices: problems and tasks // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2001. Т. 74, № 4. С. 847–858.

20. Babak V.N., Babak T.B., Kholpanov L.P. A study of the absorption of carbon dioxide with solutions of amines with the straight flow of a gas and a liquid in planar irrigated channels // Теоретические основы химической технологии. 1993. Т. 27. № 6. С. 576–585.

Авторы публикации

Шарипов Ильнар Ильдарович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Круглов Леонид Вадимович – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Круглов Вадим Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

References

1. Federal Law of 23.11.09 № 261-FZ "On energy conservation and on improving energy efficiency and on introducing amendments to certain legislative acts of the Russian Federation".

2. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Assessment of change in torque of stream-bubble contact mass transfer devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Т. 51, № 5. С. 383–387.

3. Povtarev IA, Blinichev VN, Chagin OV, Kravchik Y. Investigation of the dependence of the hydraulic resistance of the packed column equipment column // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2006. P. 49, No. 12. P. 109–110.

4. Pushnov AS, Kagan AM, Structure and hydrodynamics of column apparatus with a nozzle. Introduction to chemical engineering. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2011. 135 c.

5. Grigoryan LG, Ignatenkov Yu.I., Lesukhin S.P. Mass exchange contact device for fluid and gas interaction // Patent for invention RUS 2461406 22.11.2010.

6. Lesukhin MS, Grigoryan LG Creation of a new type of condenser based on the apparatus with vertical contact grids // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2013. No. 2 (38). Pp. 206–209.

7. Karwa N., Schmidt L., Stephan P., International Journal of Heat and Mass Transfer. № 55 (13-14) (2012).

8. Dmitrieva OS, Dmitriev AV, Nikolaev AN Heat and mass transfer device with a combined scheme of interaction of gas and liquid flows in systems of recycled water supply // Bulletin of Kazan Technological University. 2012. Т. 15, No. 11. P. 146–148.

9. Ziganshin MG, Ezhov PV, Dmitriev A.V. Efficiency of purification of gas emissions of steam generators of thermal power plants in vortex-type devices // Industrial power. 2008. № 9. P. 49–53.
10. Kalimullin IR, Dmitriev A.V. Prospects for the use of tertiary amine absorbers to improve the efficiency of gas purification in high-throughput devices // Bulletin of Kazan Technological University. 2011. № 3. P. 143–145.
11. Kalimullin IR, Dmitriev AV, Nikolaev NA Production and application of hydrogen / I.R. Kalimullin, A.V. Dmitriev, N.A. Nikolayev; Kazan: Russian Acad. Sciences, Kazan Scientific. center "Research Center for Energy Problems", 2008.
12. Makusheva OS, Dmitriev A.V. Estimation of the economic effect from the introduction of contact devices with increased capacity // Bulletin of Kazan Technological University. 2011. № 8. P. 355–357.
13. Isaev AA, Sabanayev IA, Dmitriev A.V. Development of a laboratory installation for the specialty "Industrial Heat and Power Engineering" // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. V. 16, No. 18. P. 237–239.
15. Zhumaev KK, Aslonov S.Sh., Tukhtaev B.O. Application of regular nozzles in contact heat and mass transfer apparatuses // Problems of science and education. 2017. № 2. P. 28–29.
16. Moran K., Inumaru J., Kawaji M., International Journal of Multiphase Flow, № 28 (5), (2002).
17. Moshtari, E.G. Babakhani, J.S. Moghaddas, Petroleum & Coal, № 51 (1), (2009).
18. Kryuchkov DA, Grigoryan LG Evaporative cooling in three-flow apparatus with vertical contact grids // Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices. 2013. № 2. P. 40–43.
19. Kholpanov L.P. Self-organization and dynamic chaos in chemical-technology and heat-exchange devices: problems and tasks // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2001. T. 74, № 4. C. 847–858.
20. Babak V.N., Babak T.B., Kholpanov L.P. A study of the absorption of carbon dioxide with solutions of amines with the straight flow of a gas and a liquid in planar irrigated channels // Theoretical basis of chemical technology. 1993. Vol. 27. № 6. P. 576–585.

Authors of the publication

Ilnar I. Sharipov - PhD (tech.) Sci., Associate Professor, Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan State Power Engineering University.

Leonid V. Kruglov - Senior Lecturer, Department Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan State Power Energy University.

Vadim I. Kruglov - PhD (tech.) Sci., Associate Professor, Department Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan State Power Engineering University.

Oksana S. Dmitrieva - PhD (tech.) Sci., Associate Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Kazan National Research Technological University.

Поступила в редакцию

30 мая 2018 г.



ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ ФИЛИПСА И КАРНО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

В.Г. Киселёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, kis_vg@mail.ru

Резюме: В статье на базе модернизированной физико-химической модели «идеальный газ», предполагающей наличие у него химической энергии, и теории термодинамических потенциалов произведено исследование циклов Филиппса и Карно. Рассмотрение данного явления осуществлено путем сравнения вариантов традиционного и предложенного методов анализа циклических процессов. В работе обоснована возможность исследования тепловых машин Филиппса и Карно с использованием метода термодинамических потенциалов путем построения диаграмм зависимости внутренней энергии и энергии Гельмгольца от абсолютной температуры и их сравнения с обычными диаграммами давление – объем. На основе проведенного анализа выявлены результаты, аналогичные получаемым при исследовании данных процессов традиционным способом. С другой стороны, применение новых методов исследования имеет существенное преимущество, так как позволяет непосредственно использовать активность вещества (газа) и весь арсенал химической термодинамики для анализа циклических процессов, например, в тепловых машинах Филиппса и Карно.

Ключевые слова: идеальный газ, изотермическое расширение идеального газа, термодинамический потенциал, энергия Гельмгольца, циклические процессы, цикл Филиппса, цикл Карно, адиабатическое расширение идеального газа, химический потенциал.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-154-165

Для цитирования: В.Г. Киселёв Тепловые машины Филиппса и Карно с точки зрения теории термодинамических потенциалов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 154-165. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-154-165.

CARNOT AND PHILIPS HEAT ENGINES IN VIEW OF THE THEORY OF THERMODYNAMIC POTENTIALS

V. G. Kiselev

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-1598>, kis_vg@mail.ru

Abstract: A study has been made of the Philips and Carnot cycles based on the modernized physicochemical model of "ideal gas", which utilizes the theory of thermodynamic potentials and assumes the presence of chemical energy. The feasibility study of the Phillips and Carnot heat engines using the thermodynamic potential method is substantiated by plotting the diagrams of the

dependence of the internal energy and Helmholtz energy on the absolute temperature and their comparison with the usual pressure-volume diagrams. This method is compared with traditional approach to analysis of cyclic processes. Based on the analysis carried out, the results are similar to those obtained in the study of these processes in the traditional way. On the other hand, the use of new research methods has a significant advantage, since it allows direct use of the activity of the substance (gas) and the entire arsenal of chemical thermodynamics for the analysis of cyclic processes, for example, in the thermal machines of Philips and Carnot.

Keywords: ideal gas, isothermal expansion of an ideal gas, thermodynamic potential, Helmholtz's energy, cyclic processes, Carnot cycle, Philips cycle, adiabatic expansion of an ideal gas, chemical potential.

For citation: V.G. Kiselev Carnot and philips heat engines in view of the theory of thermodynamic potentials // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 154-165. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-154-165.

Введение

В ряде предыдущих публикаций [1, 2] автором был использован метод термодинамических потенциалов для исследования ряда простейших физико-химических процессов: смешение идеальных газов (парадокс Гиббса) и изотермическое равновесное и неравновесное расширение идеального газа. Данная работа, базируясь на основных положениях, положенных в основу этих более ранних статей, продолжает тему анализа поведения идеального газа, но уже в более сложных термодинамических, а именно циклических процессах, что, по мнению автора, существенно расширяет арсенал средств, применяемых для исследования тепловых машин, и является непосредственной целью данной работы. Следует отметить, что применение теории термодинамических потенциалов к системе «смесь идеальных газов» явилось ключевым фактором и в появлении статьи под названием «Парадокс Гиббса и его решение» [1], поэтому второй целью представленной работы автор считает косвенное подтверждение основных принципов, положенных в основу этой, более ранней публикации.

Изохорное нагревание идеального газа

Прежде чем перейти собственно к анализу поведения идеального газа в термодинамических циклах Филиппса или Карно, рассмотрим изохорное нагревание одного моля идеального газа. Для этой цели воспользуемся термодинамическим потенциалом Гельмгольца F , величина которого в таком случае определяется следующим соотношением [3, стр. 31]:

$$F = F_0 - RT \ln v, \quad (1)$$

где F_0 — стандартное значение энергии Гельмгольца, которое мы примем равным нулю для абсолютной температуры, равной нулю, а также равным нулю при $v = 1$ и для любой другой температуры; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; v — объём, в котором находится один моль идеального газа.

В таком случае изменение свободной энергии Гельмгольца F_1 и F_2 с ростом абсолютной температуры для двух объёмов идеального газа v_1 и v_2 , как это следует из формулы (1), можно представить в виде двух прямых линий (а) и (b), исходящих из одной точки при $T = 0$. Очевидно, что при выбранных условиях $F_1 = F_0 - RT \ln v_1$ соответствует линии (а), а $F_2 = F_0 - RT \ln v_2$ — линии (b), причём на рассматриваемом рисунке $v_1 < v_2$ (рис. 1). Кроме того, можно отметить, что ось абсолютной температуры в нашем случае будет соответствовать линии, определяющей величину стандартной свободной энергии Гельмгольца для изотермических процессов при $v = 1$, которая, как это и следует из

формулы (1), при выбранных нами условиях будет равна нулю для всех значений абсолютной температуры. На этот же рисунок, по аналогии с графиком, представленным в работе Д. Эверета [4, стр. 56], нанесём линию (C), соответствующую изменению внутренней энергии идеального газа при постоянном объёме U при изменении абсолютной температуры от нуля до величины T , которая, как известно, в этом случае определяется следующим соотношением [5, стр. 51]:

$$U = U_0 + C_v T, \quad (2)$$

где $U_0 = 0$ — внутренняя энергия идеального газа при абсолютной температуре, равной нулю; C_v — молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме.

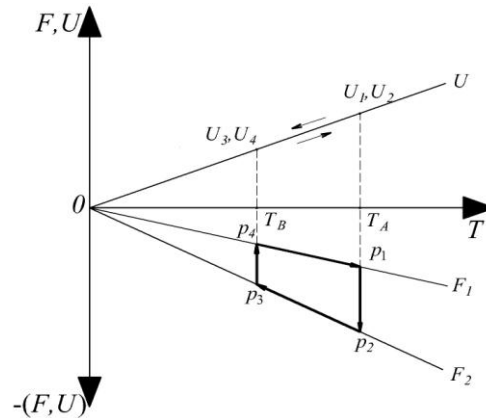
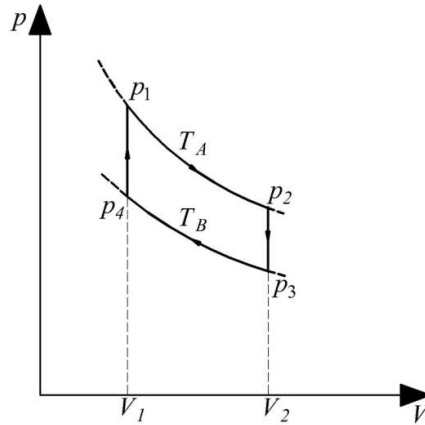


Рис. 1. Изменение свободной энергии Гельмгольца и внутренней энергии одного моля идеального газа в циклах Филиппса и Карно

Построенные нами зависимости на рис. 1 под названием «Изменение энергии Гельмгольца и внутренней энергии одного моля идеального газа в циклах Филиппса и Карно» будут использованы в последующих разделах данной работы.

Тепловая машина Филиппса

Анализ работы тепловых машин с использованием метода термодинамических потенциалов начнём с рассмотрения наиболее простого термодинамического цикла, применяемого в машине Филиппса. Данное устройство и в настоящее время может быть реализовано, например, для производства жидкого воздуха в лабораторных условиях. Принцип функционирования тепловой машины Филиппса становится понятным из следующего высказывания Д. Эверета [4, стр. 259]: «Основными частями машины являются два поршня, перемещающиеся в одном цилиндре, содержащем идеальный газ и разделённом на две части теплообменником, состоящем из тонкой медной сетки ...». Кроме того, принцип работы поясняется рис. 2 под названием: «Цикл Филиппса в p - v координатах» и последующим анализом работы машины Филиппса, которая, с целью упрощения дальнейших расчётов, помещена нами в вакуум.

Рис. 2. Цикл Филиппа в p - v координатах

Вслед за Д. Эверетом [4, стр. 259–263] проведём рассмотрение цикла Филиппа, опираясь на рис. 1 и 2.

В разделе 1 приложения «В» своей монографии [4, стр. 260–261] Д. Эверет пишет: «При правом поршне, стоящем неподвижно, когда весь газ находится в высокотемпературной части цилиндра, левый поршень движется наружу и газ расширяется изотермически при температуре T_A . Машина совершает работу над окружающей средой ... при постоянной температуре $T = T_A$:

$$W_1 = \int_{p_1}^{p_2} p dV = RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (3)$$

Одновременно от источника при температуре T_A отнимается теплота Q_1 ». На рис. 2 данный процесс иллюстрируется изотермой $p_1 - p_2$.

Этот же изотермический переход из точки p_1 в точку p_2 с точки зрения теории термодинамических потенциалов (рис. 1) может быть описан следующим образом. Химическая энергия, определяемая термодинамическим потенциалом Гельмгольца, в начальный момент времени равна (точка p_1) следующей величине:

$$F_1 = F_0 - RT_A \ln v_1. \quad (4)$$

Соответственно, после окончания рассматриваемого изотермического расширения идеального газа она может быть вычислена (рис. 1, точка p_2) с использованием уравнения, определяющего величину F_2 :

$$F_2 = F_0 - RT_A \ln v_2. \quad (5)$$

Следовательно, изменение (уменьшение) энергии Гельмгольца $\Delta F_{2,1}$ в данном изотермическом процессе соответствует отрезку $p_1 - p_2$ (рис. 1) и задаётся формулой

$$\Delta F_{2,1} = -RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (6)$$

Кроме того, известно [5, стр. 98], что в общем случае изменение свободной энергии Гельмгольца dF можно представить и в следующем виде:

$$dF = -SdT - pdv - \delta A_{\max}^*. \quad (7)$$

Наш процесс изотермический, следовательно $SdT = 0$, в то же время сторонняя не объёмно-механическая работа $\delta A_{\max}^*$ также равна нулю. В свою очередь, при интегрировании уравнения (7) в изотермических условиях и при отсутствии $\delta A_{\max}^*$

величина сторонней объёмно-механической работы $\Delta A_{\max}$ при бесконечно медленном изотермическом обратимом расширении идеального газа определяется следующим выражением:

$$\Delta A_{\max} = RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (8)$$

Графически данный процесс, помимо традиционного представления в координатах давление – объём (рис. 2, линия $p_1 - p_2$), можно представить и в координатах термодинамический потенциал Гельмгольца – абсолютная температура (рис. 1, линия $p_1 - p_2$). Причём в последнем случае, в силу того что свободная энергия Гельмгольца является функцией состояния системы, её изменение при переходе системы из точки p_1 в точку p_2 не зависит от пути процесса. При этом следует отметить, что в соответствии с рис. 1 величина внутренней энергии системы «идеальный газ» остаётся неизменной, а работа совершается исключительно за счёт протекания эндотермического химического процесса в изотермических условиях [2], то есть за счёт роста энтропии системы на следующую величину:

$$\Delta S = R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (9)$$

Очевидно, что данное изменение энтропии сопровождается соответствующим уменьшением свободной энергии Гельмгольца, определяемой соотношением

$$\Delta F = -RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (10)$$

В разделе 2 приложения «В» своей монографии [4, стр. 259–263] Д. Эверет пишет: «Оба поршня одновременно движутся вправо, и находящийся между ними объём остаётся постоянным. Газ переносится от высокотемпературной к низкотемпературной части цилиндра. При прохождении через теплообменник газ охлаждается до T_B , а его давление падает от p_2 до p_3 . Теплообменник запасает тепло в количестве $C_v(T_A - T_B)$, где C_v — теплоёмкость газа при постоянном объёме ... на этом этапе не совершается никакой работы и через стенки машины не происходит передачи тепла:

$$W_2 = 0, \quad (11)$$

$$Q_2 = 0.» \quad (12)$$

Данный процесс иллюстрируется прямой $p_2 - p_3$ на рис. 2. Однако если исходить, как мы условились ранее, из того факта, что анализу подвергается рабочее вещество (один моль идеального газа), то тогда необходимо принять, что в этом процессе оно теряет часть внутренней энергии U и, следовательно, $Q_2 \neq 0$, а определяется следующим соотношением:

$$Q_2 = C_v(T_B - T_A). \quad (13)$$

Таким образом, наблюдается уменьшение внутренней энергии идеального газа ΔU , определяемое величиной

$$\Delta U = Q_2. \quad (14)$$

В то же время рассматриваемый процесс сопровождается и изменением свободной энергии Гельмгольца $\Delta F_{3,2}$, величину которой для выбранных нами стандартных условий можно представить в следующем виде:

$$\Delta F_{3,2} = F_3 - F_2, \quad (15)$$

где $F_3 = F_0 - T_A R \ln v_2$, а $F_2 = F_0 - T_B R \ln v_2$.

Таким образом, для изменения (роста) свободной энергии Гельмгольца $\Delta F_{3,2}$ при переходе системы из точки p_2 в точку p_3 окончательно получаем:

$$\Delta F_{3,2} = -(T_B - T_A)R \ln v_2. \quad (16)$$

Очевидно, что рассматриваемая часть цикла будет сопровождаться и соответствующим изменением внутренней энергии (её уменьшением), определяемой следующей формулой:

$$\Delta U_{3,2} = C_v(T_B - T_A). \quad (17)$$

Графически данный процесс, помимо традиционного представления в координатах давление – объём (рис. 2, линия $p_2 - p_3$), можно представить и в координатах энергия Гельмгольца – абсолютная температура (рис. 1, линия $p_2 - p_3$) или в координатах внутренняя энергия – абсолютная температура (рис. 1, линия $U_1, U_2 \rightarrow U_3, U_4$). Причём в двух последних случаях, в силу того что свободная энергия Гельмгольца и внутренняя энергия являются функциями состояния системы, их изменение при переходе системы из точки p_2 в точку p_3 или из точки U_1, U_2 в точку U_3, U_4 не зависит от пути процесса.

В разделе 3 приложения «В» своей монографии [4, стр. 259–263] Д. Эверет пишет: «При стоящем неподвижно левом поршне газ изотермически сжимается при температуре T_B от объёма v_2 снова до объёма v_1 . Работа, совершаемая окружающей средой, равна

$$W_3 = -RT_B \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (18)$$

Теплота, отданная резервуару, равна Q_3 ».

Графически данный процесс традиционно представляется в координатах давление – объём (рис. 2, линия $p_3 - p_4$). Этот же изотермический переход идеального газа из точки p_3 в точку p_4 может быть описан и с позиции теории термодинамических потенциалов. В этом случае химическая энергия, определяемая свободной энергией Гельмгольца (смотри рис. 1, точка p_3), в начальный момент времени равна следующей величине:

$$F_3 = F_0 - T_B R \ln v_2. \quad (19)$$

Соответственно после окончания рассматриваемого процесса изотермического сжатия идеального газа при переходе из точки p_3 в точку p_4 свободная энергия Гельмгольца F_4 (рис. 1, точка p_4) может быть определена по формуле

$$F_4 = F_0 - T_B R \ln v_1. \quad (20)$$

Изменение (увеличение) энергии Гельмгольца $\Delta F_{4,3}$ в данной части цикла Филиппа соответствует отрезку $p_3 - p_4$ (рис. 1) и выражению

$$\Delta F_{4,3} = RT_B \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (21)$$

Известно [5, стр. 98], что в общем случае изменение свободной энергии Гельмгольца dF можно представить и в виде

$$dF = -SdT - pdv - \delta A_{\max}^*. \quad (22)$$

Наш процесс изотермический, следовательно $SdT = 0$, а сторонняя не объёмно-механическая работа $\delta A_{\max}^*$ равна нулю. В свою очередь, при интегрировании уравнения (22) в изотермических условиях (при отсутствии $\delta A_{\max}^*$), сторонняя объёмно-механическая работа $\Delta A_{\max}$ при бесконечно медленном изотермическом обратимом сжатии идеального газа определяется следующим выражением:

$$\Delta A_{\max} = -RT_B \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (23)$$

Графически данный процесс, помимо традиционного представления в координатах давление – объём (рис. 2, линия $p_3 - p_4$), можно представить и в координатах термодинамический потенциал Гельмгольца – абсолютная температура (рис. 1, линия $p_3 - p_4$). Причём в последнем случае, в силу того что свободная энергия Гельмгольца является функцией состояния системы, её изменение при переходе системы из точки p_3 в точку p_4 не зависит от пути процесса. При этом следует отметить, что в соответствии с рис. 1 величина внутренней энергии системы «идеальный газ» остаётся неизменной, а тепловыделение совершается исключительно за счёт протекания экзотермического химического процесса в изотермических условиях, то есть за счёт уменьшения энтропии системы ΔS :

$$\Delta S = -R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (24)$$

Очевидно, что данное изменение энтропии сопровождается соответствующим ростом свободной энергии Гельмгольца, определяемым следующим соотношением:

$$\Delta F = RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (25)$$

В разделе 4 приложения «В» своей монографии [4, стр. 259–263] Д. Эверет пишет: «Оба поршня двигаются налево, и общий объём газа остаётся неизменным. Газ переносится от низкотемпературного к высокотемпературному концу цилиндра. Когда газ проходит через теплообменник, он обратно забирает тепло в количестве равном $C_v(T_A - T_B)$ и нагревается до температуры T_A , а давление его поднимается до p_1 . Работа при этом не совершается и не происходит обмена теплом с окружающей средой:

$$W_4 = 0, \quad (26)$$

$$Q_4 = 0. \text{»} \quad (27)$$

Однако если исходить, как мы условились ранее, из факта, что анализу подвергается рабочее вещество (один моль идеального газа), то тогда необходимо принять, что в этом процессе оно приобретает часть внутренней энергии U и, следовательно, $Q_4 \neq 0$, а определяется следующим соотношением:

$$Q_4 = C_v(T_A - T_B). \quad (28)$$

Таким образом, мы получаем, что изменение внутренней энергии ΔU (её рост) можно оценить по формуле

$$\Delta U = Q_4. \quad (29)$$

В то же время данный процесс в терминах изменения свободной энергии Гельмгольца ΔF подлежит представлению и в следующем виде:

$$\Delta F_{1,4} = F_1 - F_4, \quad (30)$$

где $F_1 = F_0 - T_A R \ln v_1$, а $F_4 = F_0 - T_B R \ln v_1$.

Таким образом, для изменения (уменьшения) свободной энергии Гельмгольца $\Delta F_{4,1}$ при переходе системы из точки p_4 в точку p_1 при выбранных нами стандартных условиях для изотермических процессов окончательно получаем:

$$\Delta F_{4,1} = -(T_A - T_B) R \ln v_2. \quad (31)$$

Очевидно, что рассматриваемая часть цикла будет сопровождаться и соответствующим изменением (ростом) внутренней энергии, определяемой следующей формулой:

$$\Delta U_{4,1} = C_v(T_A - T_B). \quad (32)$$

Графически данный процесс, помимо традиционного представления в координатах давление – объём (рис. 2, линия $p_4 - p_1$), можно представить и в координатах энергия Гельмгольца – абсолютная температура (рис. 1, линия $p_4 - p_1$) или в координатах внутренняя энергия – абсолютная температура (рис. 1, линия $U_3, U_4 \rightarrow U_1, U_2$). Причём в двух последних случаях, в силу того что свободная энергия Гельмгольца и внутренняя энергия являются функциями состояния системы, их изменение при переходе системы из точки p_4 в точку p_1 или из точки U_3, U_4 в точку U_1, U_2 не зависит от пути процесса. При этом видно, что соответствующие изменения внутренней энергии на втором и четвёртом этапах равны друг другу по абсолютной величине, но противоположны по знаку и, таким образом, взаимно уничтожаются.

На этом этапе цикл Филиппса можно считать завершённым, а работу W , суммарно совершённую на всех этапах его протекания, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 262], можно вычислить с использованием следующей формулы:

$$W = W_1 + W_3 = R(T_A - T_B) \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (33)$$

где W_1 и W_3 – работа, совершённая в изотермическом процессе, при температуре, соответственно, T_A и T_B .

С другой стороны, метод термодинамических потенциалов, учитывая, в соответствии с Д. Эверетом [4, стр. 262], энергетическую эквивалентность процессов нагревания и охлаждения идеального газа, приводит к соотношению, аналогичному формуле (33). В этом случае для разности термодинамических потенциалов ΔF , определяемой при прохождении всего цикла Филиппса, получаем:

$$\Delta F = \Delta F_{2,1} + \Delta F_{4,3} = -R(T_A - T_B) \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (34)$$

В то же время учёт того обстоятельства, что изменение термодинамических потенциалов при протекании изотермического процесса расширения (сжатия) идеального газа равно максимальной полезной работе, взятой с обратным знаком, говорит о практической эквивалентности последних двух соотношений и, следовательно, о возможности использования метода термодинамических потенциалов для анализа цикла Филиппса.

Тепловая машина Карно

Анализ работы термодинамического цикла Карно можно найти практически в любом курсе термодинамики. Поэтому просто воспользуемся его результатами, опираясь, например, на монографию И. Пригожина. В этом случае полная работа, получаемая за обратимый цикл Карно, для одного моля газа равна [6, стр. 83–86] следующей величине:

$$W = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = Q_{12} - Q_{34} = RT_A \ln \frac{v_2}{v_1} + RT_B \ln \frac{v_4}{v_3}, \quad (35)$$

где W_{12} , W_{23} , W_{34} , W_{41} – работа, осуществляемая на соответствующих этапах цикла Карно; Q_{12} – количество тепла, поглощённого на изотерме $p_1 - p_2$, и, соответственно, Q_{34} – количество тепла, выделившегося на изотерме $p_3 - p_4$; T_A и T_B – абсолютные температуры, соответственно, верхней и нижней изотерм цикла Карно. В свою очередь, v_1 , v_2 , v_3 , v_4 –

начальные объёмы одного моля идеального газа в начале соответствующих изотерм и адиабат цикла Карно, причём, $\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$.

На рис. 3 «Цикл Карно в p - v координатах» показан график циклической работы машины Карно в координатах давление – объём идеального газа, а на рис. 1 тот же самый процесс рассматривается в координатах внутренняя энергия – абсолютная температура. С целью упрощения дальнейших расчётов примем, что рассматриваемое устройство находится в вакууме, и проведём анализ его работы с позиции химической термодинамики.

Такт 1. Изотермический переход $p_1 - p_2$. Рассмотрение этого процесса мы уже провели при анализе цикла Филиппса, поэтому просто приведём полученный ранее результат.

Работа, совершённая в этом случае идеальным газом, определяется следующей формулой (такт 1 цикла Филиппса, а также и такт 1 цикла Карно):

$$\Delta A_{\max} = RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (36)$$

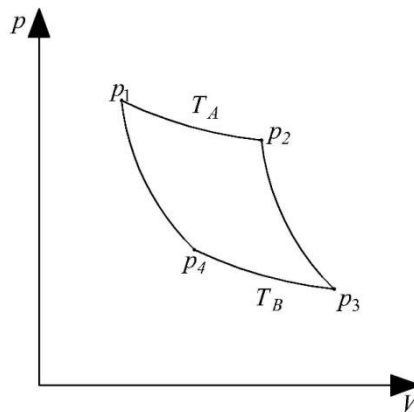


Рис. 3. Цикл Карно в p - v координатах

При этом следует отметить, что в соответствии с рис. 1 величина внутренней энергии системы «идеальный газ» остаётся неизменной, а работа совершается исключительно за счёт протекания эндотермического химического процесса, протекающего в изотермических условиях [2], и сопровождается ростом энтропии системы на величину

$$\Delta S = R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (37)$$

Очевидно, что данное изменение энтропии сопровождается соответствующим уменьшением свободной энергии Гельмгольца:

$$\Delta F = -RT_A \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (38)$$

На рис. 1 данный процесс изображается точкой U_1 , U_2 , так как изменение внутренней энергии в данном случае не наблюдается.

Такт 2. Адиабатический переход $p_2 - p_3$. Для анализа этого процесса воспользуемся уравнением, объединяющим первое и второе начала термодинамики [5, стр. 97]:

$$\delta A'_{\max} = -dU + TdS - PdV, \quad (39)$$

где $\delta A'_{\text{макс}}$ – изменение максимальной полезной работы (не объёмно-механической); dU – изменение внутренней энергии системы; T – абсолютная температура; dS – изменение энтропии системы; P – давление в системе; v – объём, в котором находится один моль идеального газа.

В нашем случае при адиабатическом расширении идеального газа сторонняя не объёмно-механическая работа отсутствует, то есть $\delta A'_{\text{макс}} = 0$, а в силу постоянства энтропии и величина $TdS = 0$. В таком случае получаем:

$$dU = -Pdv. \quad (40)$$

И, следовательно, всё изменение (уменьшение) величины внутренней энергии системы будет равно максимальной полезной объёмно-механической работе.

В свою очередь, при охлаждении идеального газа от температуры T_A до температуры T_B , в соответствии с И. Пригожиным [6, стр. 158], для интегрального процесса изменения ΔU (внутренней энергии) можно привести выражение

$$\Delta U = -C_v(T_A - T_B). \quad (41)$$

Таким образом, следует констатировать, что максимальная полезная объёмно-механическая работа, которую может совершить система «идеальный газ» в адиабатическом процессе, определяется интегрированием уравнения (40) в пределах, устанавливаемых соотношением (41), и, следовательно, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$C_v(T_A - T_B) = RT_B \ln \frac{v_3}{v_2}. \quad (42)$$

Так как в последнем равенстве неизвестна только одна величина, то, следовательно, оно пригодно для определения конкретного значения v_3 . Аналогичная ситуация (с точностью до знака) возникает и при адиабатическом сжатии идеального газа.

На рис. 1 данный процесс изображается отрезком $U_1, U_2 \rightarrow U_3, U_4$.

Такт 3. Изотермический переход $p_3 - p_4$. Рассмотрение этого процесса мы уже провели при анализе цикла Филиппа, поэтому просто приведём полученный ранее результат с учётом новых обозначений:

$$\Delta A_{\text{макс}} = -RT_B \ln \frac{v_3}{v_4}. \quad (43)$$

На рис. 1 данный процесс изображается точкой U_3, U_4 , так как изменение внутренней энергии в данном случае не наблюдается.

Такт 4. Адиабатический переход $p_4 - p_1$. Анализ этого процесса, с точностью до знака, проведён нами ранее при рассмотрении такта 2 цикла Карно, поэтому в данном разделе просто приведём конечную формулу, определяющую изменение внутренней энергии рассматриваемой системы:

$$C_v(T_A - T_B) = -RT_B \ln \frac{v_1}{v_4}. \quad (44)$$

Так как в последнем равенстве неизвестна только одна величина, то, следовательно, оно пригодно и для определения конкретного значения v_4 . Кроме того, следует отметить, что объёмно-механические работы, присутствующие в соотношениях (42) и (44), равны друг другу, но противоположны по знаку, поэтому в циклическом процессе они взаимно уничтожаются.

На рис. 1 данный процесс изображается отрезком $U_3, U_4 \rightarrow U_1, U_2$.

Таким образом, можно констатировать, что сложение всех работ цикла Карно, полученных с использованием метода термодинамических потенциалов, приводит к

соотношению, аналогичному формуле (35). В этом случае для разности термодинамических потенциалов ΔF , определяемой при прохождении всего цикла, получаем:

$$\Delta F = \Delta F_{2,1} + \Delta F_{4,3} = -R(T_A - T_B) \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (45)$$

В то же время, учитывая то обстоятельство, что изменение термодинамических потенциалов при протекании изотермического процесса расширения (сжатия) идеального газа равно максимальной полезной работе, взятой с обратным знаком, получаем соотношение (35), определяющее работу цикла Карно.

Данный факт свидетельствует о полной эквивалентности результатов, полученных для рассматриваемого цикла как с использованием традиционных методов анализа, так и с использованием метода термодинамических потенциалов.

Обсуждение результатов и выводы

В последние годы наблюдается устойчивый интерес к исследованию идеального газа со стороны как отечественных, так и иностранных специалистов, что подтверждается целым рядом публикаций, посвящённых этой проблеме [7–10]. Представленная работа выполнена в рамках этого мощного современного тренда. В ней проведён сравнительный анализ поведения идеального газа с использованием традиционных методов исследования и метода термодинамических потенциалов при осуществлении циклов Филиппа и Карно, что позволило установить полную эквивалентность полученных результатов. Кроме того, следует отметить, что при использовании в качестве рабочего тела в тепловых машинах Филиппа и Карно реальных газов, возникают технические и математические трудности, связанные с созданием и интегрированием соответствующих уравнений состояния. В данном случае метод термодинамических потенциалов имеет преимущества, так как позволяет непосредственно использовать активность вещества (газа) и весь арсенал химической термодинамики для анализа циклических процессов.

На основании проведённой работы можно сделать следующие **выводы**:

1. Построена диаграмма в координатах абсолютная температура – свободная энергия Гельмгольца, внутренняя энергия, описывающая процесс работы тепловой машины Филиппа, с использованием идеального газа в качестве рабочего тела.
2. Проведён анализ работы тепловой машины Филиппа с использованием метода термодинамических потенциалов и показана полная идентичность данных результатов с результатами, полученными при использовании традиционных методов анализа на основе диаграммы давление – объём для рабочего тела «идеальный газ».
3. Построена диаграмма в координатах абсолютная температура – внутренняя энергия, описывающая процесс работы тепловой машины Карно, с использованием идеального газа в качестве рабочего тела.
4. Проведён анализ работы тепловой машины Карно с использованием метода термодинамических потенциалов и показана полная идентичность данных результатов с результатами, полученными при использовании традиционных методов анализа на основе диаграммы давление – объём для рабочего тела «идеальный газ».

Литература.

1. Киселёв В.Г. Парадокс Гиббса и его решение / В.Г. Киселёв // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11-12. С. 129–137.
2. Киселёв В.Г. Изотермическое расширение идеального газа и химическое сродство / В.Г. Киселёв // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 11-12. С. 110–118.
3. Маршаков И.К. Термодинамика и коррозия сплавов: монография / И.К. Маршаков// Воронеж: Изд-во «Воронежского университета», 1983. 168 с.
4. Эверет Д. Введение в химическую термодинамику: монография/ Д. Эверет // Москва: «Издательство иностранной литературы», 1963. 299 с.

5. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика: монография / М.Х. Карапетьянц // Москва – Ленинград: «Государственное научно-техническое издательство химической литературы», 1953. 611 с.
6. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: монография / И. Пригожин, Д. Кондепуди // М.: Мир, 2002. 461 с.
7. Куликова А.А. Особенности прямых круговых процессов в идеальном газе / А.А. Куликова, И.Н. Дюкова, И.В. Иванова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. № 212. С. 130–139.
8. Oxtoby N.P. Ideal gas behavior of a strongly coupled complex (dusty) plasma / N.P. Oxtoby, E.J. Griffith, C. Durniak, J.F. Ralph, D. Samsonov // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111(1). P. 015002(1–5).
9. Lastovka V. Predictive correlations for ideal gas heat capacities of pure hydrocarbons and petroleum fractions / V. Lastovka, J.M. Shaw // Fluid Phase Equilibria. 2013. Vol. 356. P. 338–370.
10. Williams D.M. On stagnation pressure increases in calorically perfect ideal gases / D.M. Williams, D.S. Kamenetskiy, P.R. Spalart // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2016. Vol. 58. P. 40–53.

Авторы публикации

Киселев Владимир Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомная и тепловая энергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: kis_vg@mail.ru.

References

1. Kiselev V.G. Gibbs paradox and it's solution / V.G. Kiselev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2016. № 11-12. P. 129–137.
2. Kiselev V.G. The isothermal expansion of perfect gas and the chemical affinity / V.G. Kiselev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2016. № 11-12. P. 110–118.
3. Marshakov I.K. Thermodynamics and corrosion of alloys: monograph / I.K. Marshakov // Voronezh: Publishing house "Voronezh University", 1983. 168 p.
4. Everett D. Introduction to chemical thermodynamics: monograph / D. Everett // Moscow: "Foreign Literature Publishing House", 1963. 299 p.
5. Karapetyants M.H. Chemical thermodynamics: monograph / M.H. Karapetyants // Moskva – Leningrad: «Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury», 1953. 611 p.
6. Prigozhin I., Kondepudi D. Contemporary thermodynamics. From the heat engines to the dissipative structures: monograph / I. Prigogine, D. Kondepudi // M.: Mir, 2002. 461 p.
7. Kulikova A.A. Features of direct circular processes in an ideal gas / A.A. Kulikova, I.N. Dyukova, I.V. Ivanova // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2015. № 212. P. 130–139.
8. Oxtoby N.P. Ideal gas behavior of a strongly coupled complex (dusty) plasma / N.P. Oxtoby, E.J. Griffith, C. Durniak, J.F. Ralph, D. Samsonov // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111(1). P. 015002(1–5).
9. Lastovka V. Predictive correlations for ideal gas heat capacities of pure hydrocarbons and petroleum fractions / V. Lastovka, J.M. Shaw // Fluid Phase Equilibria. 2013. Vol. 356. P. 338–370.
10. Williams D.M. On stagnation pressure increases in calorically perfect ideal gases / D.M. Williams, D.S. Kamenetskiy, P.R. Spalart // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2016. Vol. 58. P. 40–53.

Authors of the publication

Kiselev Vladimir Gennad'evich — Doc. Sci. (Techn.), professor, department “Nuclear and Heat Power Engineering”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Поступила в редакцию

11 апреля 2018 г.

РЕЦЕНЗИИ И ИНФОРМАЦИЯ

ГУРЕВИЧ В.И.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬС ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА И ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ НЕГО



В издательстве Инфра-Инженерия вышла в свет новая книга канд. техн. наук В.И. Гуревича, объемом свыше 500 страниц, под интригующим названием: *"Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него"*.

В этой необычной книге рассказывается об истории развития военных ядерных программ в СССР и США, о роли разведки в создании ядерного оружия в СССР, обнаружении электромагнитного импульса при ядерном взрыве (ЭМИ ЯВ), о многочисленных испытаниях ядерных боеприпасов.

В доступной для неспециалистов в области ядерной физики форме описан процесс образования ЭМИ ЯВ при подрыве ядерного боеприпаса на большой высоте, показано влияние многочисленных факторов на интенсивность ЭМИ ЯВ и его параметры.

Рассмотрено влияние ЭМИ ЯВ на электронные компоненты и устройства, а также

и на силовое электрооборудование энергосистем. Большую часть книги занимает описание практических (а не теоретических, как в сотнях отчетов на эту тему) средств и методов защиты электронного и электротехнического оборудования от ЭМИ ЯВ, испытания этого оборудования на устойчивость к ЭМИ ЯВ, оценки эффективности средств защиты.

В книге использованы многочисленные документы и фотографии, которые были рассекречены и стали общедоступными лишь недавно.

По широте охвата проблемы, новизне, глубине и практической значимости описанных технических решений книга является, фактически, энциклопедией ЭМИ ЯВ и не имеет аналогов на книжном рынке.

Книга рассчитана на инженеров-электриков и энергетиков, разрабатывающих, проектирующих и эксплуатирующих электронное и электротехническое оборудование, а также будет полезна преподавателям вузов и студентам. Много интересного найдут в ней также и любители истории техники.