

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

АБДУЛЛАЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., ГОРЛОВ А.Н., ШАКУРОВА З.М., ТАБАЧНИКОВА Т.В., ШУМИХИНА О.А., ГИБАДУЛЛИН Р.Р. Исследование энергоэффективности и моделирование технических характеристик электрических аппаратов.....	3
АРЕСТОВА А.Ю., УЛЬЯНОВ В.Н., ФРОЛОВ М.Ю. Алгоритм расчета показателей энергоэффективности оборудования нефтегазодобывающего предприятия.....	16
БОРОДИН М.В., ВИНОГРАДОВ А.В., БУКРЕЕВ А.В., ПАНФИЛОВ А.А. Структура времени определения источника искажений показателей качества электрической энергии и программно-аппаратный комплекс для его сокращения.....	29
БОЯРСКАЯ Н.П., ДОВГУН В.П., ЕГОРОВ Д.Э., НОВИКОВ В.В., ШАНДРЫГИН Д.А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах.....	42
КРЮКОВ А.В., ЛЮБЧЕНКО И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта.....	53
МАСКОВ Л.Р., КОРНИЛОВ В.Ю. Анализ структуры и энергетических параметров электротехнического комплекса газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург»....	66

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

СИНЮКОВ А.В., СИНЮКОВА Т.В., ГРАЧЕВА Е.И., KOLCUN M., VALTCHEV S. Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов.....	87
САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием.....	99
МАРТЫНОВ К.В., ПАНТЕЛЕЕВА Л.А., БЛАГОДАТСКИХ И.А. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой.....	109
МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ЧИЛЯЕВА М.Р., ИМАМИЕВ А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели.....	119
СОЛУЯНОВ Ю.И., ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТШИН А.Р., СОЛУЯНОВ В.И. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания.....	134
ТАТЕВОСЯН А.А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.....	148

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ЦВЕТКОВ А.Н., ДОАН НГОК ШИ. Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования электроприводов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой.....	157
---	-----

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

ABDULLAZYANOV EY, GRACHEVA EI, GORLOV AN, SHAKUROVA ZM, TABACHNIKOVA TV, SHUMIKHINA OA, GIBADULLIN RR. Energy efficiency research and modeling of technical characteristics of electrical devices.	3
ARESTOVA AYU, ULYANOV VN, FROLOV MYU. The calculation algorithm of oil and gas production enterprise energy efficiency indicators.	16
BORODIN MV, VINOGRADOV AV, BUKREEV AV, PANFILOV AA. Time structure of the distortion source identification of the electric power quality indicators and hardware and software system for its reduction.	29
BOYARSKAYA NP, DOVGUN VP, EGOROV DE, NOVIKOV VV, SHANDRIGIN DA. Minimization of power losses in passive power filters.	42
KRYUKO AV, LYUBCHENKO IA. Improving the quality of electricity in the power supply systems of stationary objects of railway transport.	53
MASKOV LR, KORNILOV VYU. Analysis of the structure and energy parameters of the electrical complex (EC) of gas complex №1 «Gazprom dobycha Yamburg» LLC.	66

ELECTRICAL ENGINEERING

SINYUKOV AV, SINYUKOVA TV, GRACHEVA EI, KOLCUN M., S VALTCHEV. Optimized sensorless control systems for cargo movement mechanisms.	87
SAVENKO AE, SAVENKO PS. Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning.	99
MARTYNOV KV, PANTELEEVA LA, BLAGODATSKIY IA. Estimation of energy characteristics of the asynchronous motor with a combined winding.	109
MALEV NA, POGODITSKY OV, CHILYAEVA MR, IMAMIEV AR. Algorithm for parametric identification of the dc electric drive using the inverse model.	119
SOLUYANOV YUI, FEDOTOV AI, AKHMETSHIN AR, SOLUYANOV VI. Analysis of actual electric loads public premises, built in residential buildings.	134
TATEVOSYAN AA. Optimization of parameters of quiet permanent magnet synchronous motor for linear drive of long-stroke single-stage piston compressor.	148

INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION MEASURING DEVICES
AND SYSTEMS

TSVETKOV AN, DOAN NGOK SHI. Hardware-software complex for experimental research of electric drives of asynchronous motors with squirrel-cage rotor with traditional winding and motors with combined winding.	157
--	-----

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Абдуллазянов¹ Э.Ю., Грачева¹ Е.И., Горлов² А.Н., Шакурова¹ З.М., Табачникова³ Т.В., Шумихина¹ О.А., Гибадуллин Р.Р.¹

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

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

³Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия
epp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследовать проблему оценки энергоэффективной эксплуатации низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в электротехнических комплексах, проанализировать современное состояние российского рынка электрических аппаратов и разработать алгоритм и модели основных технических характеристик автоматических выключателей пускателей электромагнитных и контакторов различных заводов-изготовителей. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи исследовано соотношение величины номинального тока аппарата и сопротивления контактов и контактных соединений аппаратов некоторых заводов-производителей. Анализ экспериментальных данных показал, какой вид имеют функциональные зависимости сопротивлений контактов от номинального тока. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработаны аппроксимирующие функции по результатам экспериментальных исследований величины сопротивлений контактов от основных номинальных параметров автоматов, пускателей электромагнитных и контакторов некоторых заводов-изготовителей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В статье разработаны алгоритм и модели оценки энергоэффективности эксплуатации низковольтных электрических аппаратов, позволяющие уточнять величину потерь мощности (электроэнергии) в оборудовании и рекомендуемые для повышения достоверности расчета потерь электроэнергии в низковольтных сетях электротехнических комплексов.

Ключевые слова: электрические аппараты; энергоэффективность; потери мощности; сопротивление контактов; аппроксимирующие функции; электротехнические комплексы;

Благодарности: Публикация выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № 0851-2020-0032 «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем».

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Шумихина О.А., Гибадуллин Р.Р. Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.

RESEARCH OF THE QUALITY OF FUNCTIONING OF LOW-VOLTAGE ELECTRIC DEVICES AS A PART OF ELECTRICAL COMPLEXES

EY. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹,
TV. Tabachnikova³, OA. Shumikhina¹, RR. Gibadullin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

³Almetyevsky State Oil Institute

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To investigate the problem of evaluating the energy-efficient operation of low-voltage switching devices installed in electrical complexes, to analyze the current state of the Russian market of electrical devices and to develop an algorithm and models of the main technical characteristics of circuit breakers of electromagnetic starters and contactors of various manufacturers. *METHODS.* In solving this problem, the ratio of the nominal current of the device and the resistance of contacts and contact connections of devices of some manufacturing plants is investigated. The analysis of experimental data showed what kind of functional dependences of contact resistances on the rated current have. *RESULTS.* Approximating functions have been developed based on the results of experimental studies of the value of contact resistances from the main nominal parameters of automatic machines, electromagnetic starters and contactors of some manufacturers. *CONCLUSION.* The article develops an algorithm and models for evaluating the energy efficiency of operation of low-voltage electrical devices, allowing to specify the amount of power (electricity) losses in equipment and recommended to increase the reliability of calculating electricity losses in low-voltage networks of electrical complexes.

Keywords: *electrical device; energy efficiency; power losses; contact resistance; approximating functions; electrical complexes.*

Acknowledgements: *The publication was carried out with the financial support of the state task of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, project No. 0851-2020-0032 «Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems».*

For citation: Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM, Tabachnikova TV, Shumikhina OA, Gibadullin RR. Research of the quality of functioning of low-voltage electric devices as a part of electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.

Введение

В Российской Федерации вопросам повышения надежности электроснабжения и энергоэффективности эксплуатации электрооборудования в настоящее время уделяется пристальное внимание [1-4]. Это обусловлено повышением стоимости как энергоносителей и электроэнергии, так и стоимости оборудования систем электроснабжения. Ужесточаются требования к качеству электроэнергии [5-9]. Получают дальнейшее развитие новые виды электрооборудования на всех уровнях напряжения, что требует поиска новых путей оптимизации режимных и схемных параметров систем электроснабжения [10-13].

Как известно, наиболее разветвленными и протяженными в составе внутризаводских электротехнических комплексов являются электрические сети низкого напряжения, содержащие в своем составе большое количество низковольтной коммутационной аппаратуры (НКА). Поэтому выявление наиболее энергоэффективных аппаратов является актуальной задачей и способствует возможности оптимального внедрения мероприятий по энергосбережению в электротехнических комплексах. Исследованию технических характеристик НКА посвящено много работ, например [10-12]. Однако, не все параметры аппаратов достаточно хорошо изучены. Например, потери мощности в аппарате и величина сопротивления контактов и контактных соединений не всегда представлены в каталожных данных. Достоверная оценка этих величин требуется для уточнения уровня потерь электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения.

Внедрение в электротехнических комплексах таких систем, как «умные сети» «интеллектуальные сети» [13-18] также требует повышения эффективности эксплуатации коммутационной аппаратуры, применения новых конструкторских разработок и исследования технических параметров аппаратов.

Исследование технических параметров электрических аппаратов низкого напряжения

Проведем исследование, особенностей технических характеристик контактных аппаратов низкого напряжения российского производства.

В таблицах 1 и 2 показаны каталожные и стоимостные данные автоматических выключателей, контакторов и пускателей электромагнитных таких фирм, как *IEK GROUP*, Курский электроаппаратный завод, компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», АО «КОНТАКТОР», ОАО «Дагэлектроавтомат», АО «Владикавказский завод «Электроконтактор», АО «ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД».

Таблица 1

Основные каталожные данные автоматов некоторых заводов-производителей			
Завод-изготовитель	Марка оборудования	Величина Ином а, А	Цена оборудования на 01.10.2021 г.,руб.
Автоматические выключатели			
IEK GROUP ООО «ИЭКХОЛДИНГ» (г. Подольск)	BA 47-29	0,50-63,0	206-1406
	BA 47-29 GENERICA	6,0-63,0	153-605
	BA47-60M	1,0-63,0	276-1937
	BA47-150	63,0-125,0	1744-8639
	BA 07M	800,0-3200,0	165908-342801
	BA88MASTER	16,0-630,0	4910-81191
Курский электроаппаратный завод (г. Курск)	Optimat A	1000,0-6300,0	267850-325439
	BA 21 АЭС	0,6-100,0	3005-15629
	BA 55-41	250,0-1000,0	78331-134555
	BA 56-41	250,0-1000,0	61231-133769
	BA 57-31АЭС	16,0-100,0	4080-4696
	BA57-35АЭС	16,0-250,0	5506-216934
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	AV-6	1,0-63,0	468-2916
	AV-10	1,0-63,0	1146-5085
	AV-6DC	1,0-63,0	1112-12888
	AV POWER	10,0-1600,0	14358-305481
	BA-99C (Compact NS)	12,5-630,0	10467-119371
	BA 99	16,0-1600,0	14358-305481
АО «КОНТАКТОР» (г. Ульяновск)	BA 47-100 Про	10,0-100,0	568-2261
	BA 04-31 Про	16,0-125,0	2983-4351
	BA 04-35 Про	125,0-250,0	5504-6567
	AB2M10H-53-41	800,0-1000,0	122206-139067
	Электрон Э	630,0-4000,0	233446-732153
	Электрон М	250,0-1600,0	218003-367727
ОАО «Дагэлектроавтомат» (г. Кизилюрт)	AE-2063	16,0-250,0	1332-1739
	AE-2066	16,0-250,0	1364-1839

Таблица 2

Основные каталожные данные контакторов и пускателей электромагнитных			
Завод-изготовитель	Марка оборудования	Величина Ином, А	Цена оборудования
Контакторы			
IEK GROUP ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» (г. Подольск)	КМИ	9,0 – 95,0	865-5907
	КТИ	115,0 – 630,0	25663-162978
	МКИ	6,0 – 16,0	260-1290
Курский электроаппаратный завод (г. Курск)	ПМ12	10,0-250,0	853-61056
	ПМЛ	10,0-800,0	679-88901
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	КМЭ	9,0-95,0	943-5848
	КТЭ	115,0-630,0	11150-75954
	КТЭ реверсивный	115,0-630,0	25406-161348

Продолжение таблицы 2

	КМ	16,0-63,0	1581-4363
	КМ РУ	16,0-63,0	1748-4581
АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» (г. Владикавказ)	КПВ	160,0-630,0	6990-27990
	МК	40,0-160,0	5990-18988
	КПД	160,0-250,0	10990-12890
	КМ	9,0-95,0	567-1990
	КВТ	160,0-1000,0	18800-54800
	КВ	160,0-1000,0	7800-55051
	КМЭ	9,0-95,0	290-1680
АО «ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД» (г. Чебоксары)	МК2-20Б	40,0-63,0	8095-11387
Пускатели электромагнитные			
IEK GROUP ООО «ИЭКХОЛДИНГ» (г. Подольск)	ПМ-12	10,0 – 630,0	1820 – 1837
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	КМЭ	9,0-95,0	3272-18382
АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» (г. Владикавказ)	ПМЛ	9,0-400,0	280-21900
	КМН	9,0-95,0	290-1680

На рисунке 1 показаны данные сравнительного анализа ценовой политики на НКА с аналогичными эксплуатационными параметрами наиболее крупных заводов-производителей.

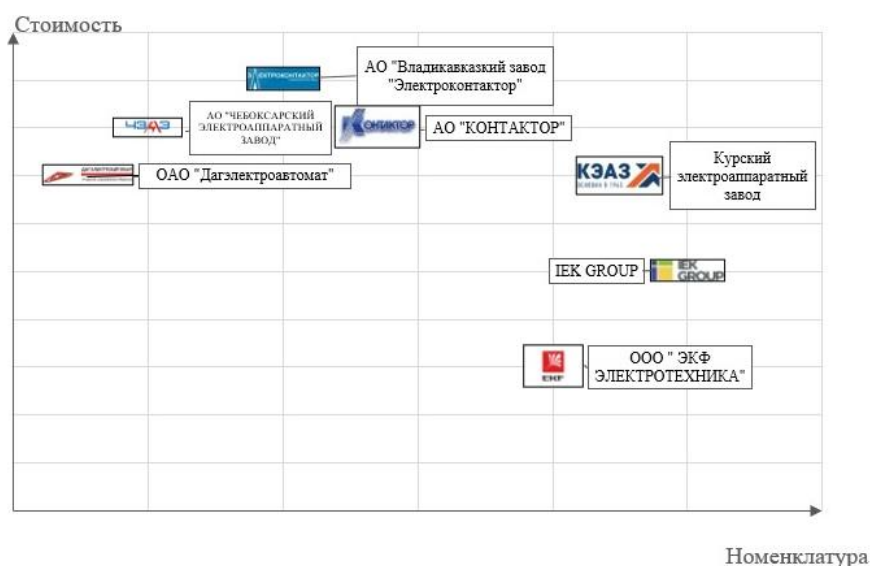


Рис.1. Сравнительный анализ соотношения «номенклатура-стоимость» для НКА

Fig.1. Comparative analysis of the "nomenclature-cost" ratio for the NCA

Для сравнения технических характеристик НКА, как правило, применяются три подхода.

Первый подход исследует конструктивные особенности аппаратов - геометрию и структуру контактных соединений, биметаллических материалов, защиту от электрических

дуг и др.

При этом выявлено, что различие в конструкции автоматических выключателей определяется типом защиты расцепителей, а также количеством пластин дугогасительной камеры, что соответствует режиму эксплуатации.

Во втором подходе исследуется материал контактов аппарата. Для контактов автоматов характерным является наличие серебряных напаяек.

В третьем подходе исследуются основные технические параметры аппаратов.

Исследование энергоэффективности электрических контактных аппаратов

Энергоэффективность электрических контактных аппаратов, в значительной степени, определяется рациональной конструкцией и выполняемыми функциями, а также значениями потерь мощности в контактных соединениях. Проиллюстрируем графически, как зависят потери мощности в контактах автоматов ΔP_a , Вт, от значений номинальных токов $I_{ном}$, А – рисунках 2 и 3.

Для оценки эффективности работы автоматических выключателей определены графические зависимости величины потерь активной мощности в контактных системах от номинального тока для автоматов различных заводов (рис.2,3).

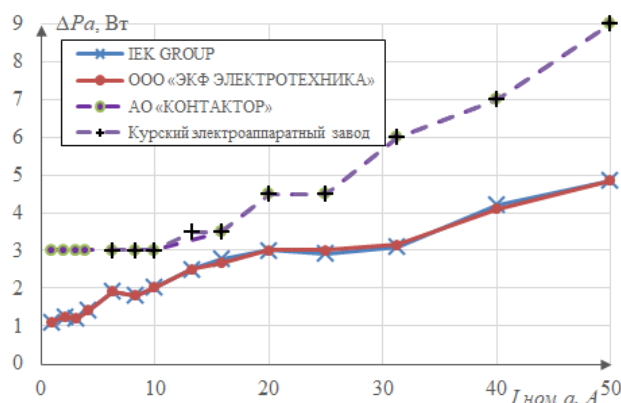


Рис.2. Графические зависимости в контактах автоматических выключателей с $I_{ном а}=1 \div 50 А$

Fig.2. Graphical dependencies in the contacts of circuit breakers with $I_n a = 1 \div 50 A$

По графическим зависимостям (рис. 2) можно видеть, что значения потерь на полюс в автоматах с $I_{нома}=0,5 \div 50 А$ заводов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» меньше, чем в автоматах курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР», что является характеристикой более энергоэффективного использования аппаратов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА». При этом, для $I_{нома}=25$ и $32 А$ меньшие потери мощности на полюс аппарата характерны для автоматических выключателей *IEK GROUP*.

Наибольшее различие потерь мощности – в 2-3 раза наблюдается для автоматов с небольшими номинальными токами $I_{нома} = 0,5 \div 6 А$. По критерию минимальных потерь в данном диапазоне токов следует рекомендовать к установке аппараты фирм *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА». При $I_{нома} = 10 \div 50 А$ различие в потерях в контактах аппаратов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», имеющих наименьшие потери, по отношению к аппаратам фирм курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР» составляет приблизительно 10-15%. При этом стоимостные показатели выгоднее у оборудования *IEK GROUP*. В среднем, цена аппаратов этого производителя примерно в 2 раза ниже, чем аппаратов ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (табл. 1). Стоимость оборудования заводов курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР» выше, чем *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (табл. 1).

Для автоматов с номинальными токами в диапазоне $I_{ном а}= 50 \div 650 А$ наименьшая величина потерь мощности также характерна для автоматов *IEK GROUP* (рис. 3).

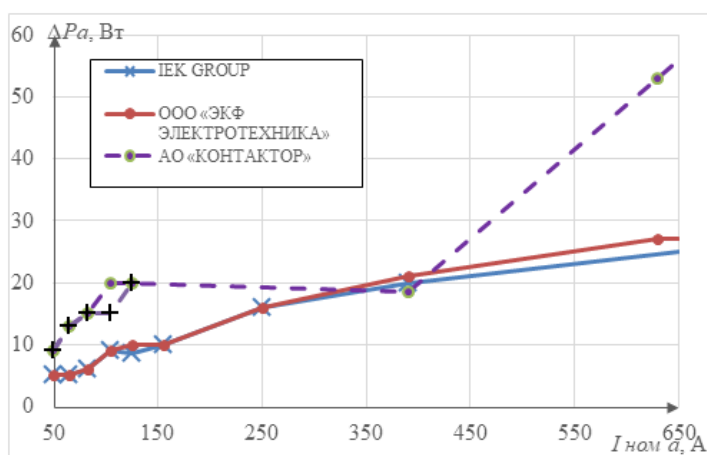


Рис.3. Графические зависимости в контактах автоматов ($I_{ном a} = 50 \div 630 \text{ A}$)

Fig.3. Graphical dependencies in the contacts of automata ($I_{ном a} = 50 \div 630 \text{ A}$)

Для окончательного принятия решений по установке оборудования той или иной фирмы, требуются детальные исследования соотношения «цена-качество» с применением дополнительных критериев, что планируется авторами осуществить в будущем.

Рисунки 4, 5 графически иллюстрируют аналогичные зависимости для контакторов $\Delta P_k = f(I_{номк})$

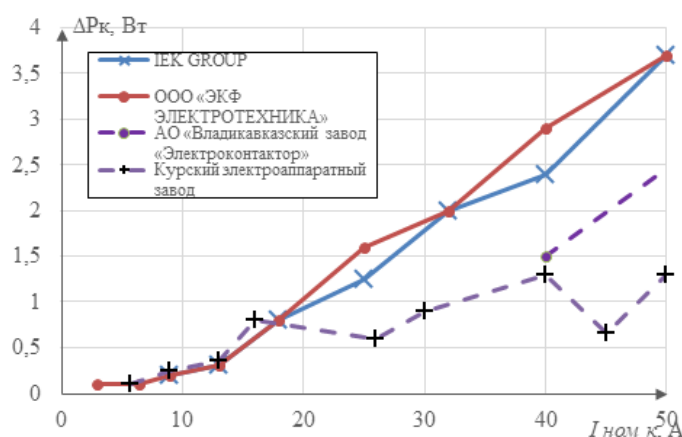


Рис.4. Графические зависимости в контакторах ($I_{номк} = 2 \div 63 \text{ A}$)

Fig.4. Graphical dependencies in contactors ($I_{номк} = 2 \div 63 \text{ A}$)

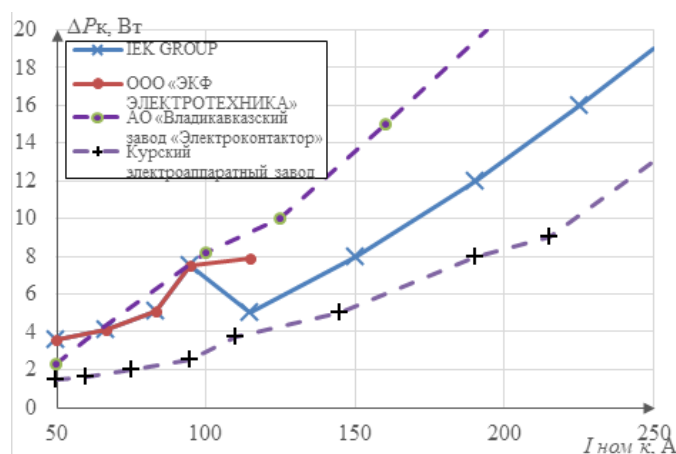


Рис.5. Графические зависимости в контакторах ($I_{номк} = 63 \div 250 \text{ A}$)

Fig.5. Graphical dependencies in contactors ($I_{номк} = 63 \div 250 \text{ A}$)

Графические зависимости (рис. 4 и 5) показывают, что наименьшее значение потерь в контактах контакторов характерно для оборудования курского электроаппаратного завода на большей части диапазонов исследования номинальных токов – $I_{номк} = 3-50 \text{ A}$, $I_{номк} = 50-250 \text{ A}$.

И, если до $I_{номк}=20$ А величина потерь приблизительно одинакова для всех рассматриваемых контакторов, то с увеличением номинального тока до 50 А (рис. 4) потери в контакторах курского электроаппаратного завода меньше относительно оборудования АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» и IEK GROUP на 10%. А при $I_{номк}=100-250$ А различие в величине потерь снижается до 5-6%, меньшие потери также в контакторах курского электроаппаратного завода.

Определим сопротивление контактов аппаратов

$$R_{ка} = \frac{\Delta P_{ка}}{I_{номка}^2} \quad (1)$$

где $\Delta P_{ка}$ – значение потерь мощности по каталогу; $I_{номка}$ – величина номинального тока аппарата.

Таблица 3

Технические параметры автоматов IEK GROUP. ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», курский электроаппаратный завод, АО «КОНТАКТОР»

$I_{номка}, А$	Значение потерь, Вт				Вычисленное сопротивление контактов, мОм			
	IEK GROUP	Курский электр аппаратный за вод	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХ НИКА»	АО «КОНТАКТОР »	IEK GROUP	Курский электр аппаратный за вод	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХ НИКА»	АО «КОНТАКТОР »
1	1,2	-	1,2	2,92	1190	-	1190	2900
2	1,3	-	1,3	2,92	325	-	325	750
3	1,27	-	1,27	2,92	144,4	-	144,4	333,4
4	1,39	-	1,39	2,92	87,5	-	87,5	187,6
6	1,8	3	1,8	3	50	83,3	50	83,3
10	1,9	3	2,1	3	19	30,0	21	30
16	2,7	3,5	2,6	3,5	10,5	13,7	10,2	13,7
20	3	4,5	3	4,5	7,5	11,3	7,5	11,3
25	2,8	4,5	3	4,5	4,5	7,2	4,8	7,2
32	3,1	6	3,2	6	3,03	5,86	3,13	5,86
40	3,7	7,5	4,1	7,5	2,31	4,69	2,56	4,69
50	4,5	9	4,8	9	1,80	3,60	1,92	3,60
63	5,2	13	5,2	13	1,31	3,28	1,31	3,28
80	7,1	15	7,1	15	1,11	2,34	1,11	2,34
100	7,5	15	8,7	20	0,75	1,50	0,87	2,00
125	8,3	20	10,1	-	0,53	1,28	0,65	-
160	10	-	10	-	0,39	-	0,39	-
250	16,7	-	16,7	-	0,27	-	0,27	-
400	21	-	21,8	18,4	0,14	-	0,15	0,12

Результаты расчетов сопротивлений контактов автоматов показаны в таблице 3. Исходной информацией при этом являются указанные в каталогах номинальные характеристики аппаратов.

Рисунок 6 иллюстрирует аппроксимированные расчетные графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$ для исследуемого оборудования. При этом рассматривается наиболее распространенное в эксплуатации оборудование с $I_{номка}$ до 100 А. Фирмы-изготовители НКА не всегда предоставляют данные о потерях в контактных группах низковольтной аппаратуры, поэтому выявление зависимостей $R_{НКА} = f(I_{номнка})$ является актуальной

задачей.

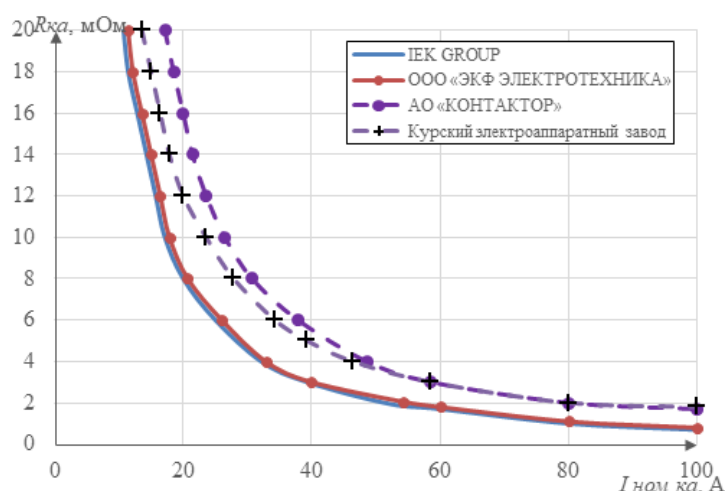


Рис.6. Графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$

Fig.6. Graphs of functions $R_{ка} = f(I_{номка})$

На рисунок 6 показаны графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$. Представленные номограммы позволяют оценивать величину исследуемых сопротивлений контактов автоматов.

Обсуждение результатов

В результате проведения экспериментов по измерению сопротивлений контактов аппаратов по методу амперметра-вольтметра [1] получены функциональные соотношения экспериментальных значений сопротивлений и номинальных параметров автоматов $R_{эа} = f(I_{нома})$ (рис. 7), контакторов $R_{эк} = f(I_{номк})$ (рис. 9) и магнитных пускателей $R_{эмп} = f(I_{номмп})$ (рис. 10).

Графики (рис. 8) показывают, как изменяется сопротивление контактов автоматов при изменении загрузки аппаратов (Кза) на примере оборудования *IEK GROUP*.

Экспериментальные исследования проводились на не менее чем 20-ти аппаратах каждого номинального тока, сопротивление контактов было измерено 3 раза. Затем среднее значение измеренного сопротивления было зафиксировано в протоколе испытаний.

Далее по методу наименьших квадратов аппроксимированы зависимости $R_{ка} = f(I_{нома})$ и представлены полученные уравнения в табл. 4. Аппроксимация проведена в программе *Mathcad*.

Таблица 4

Уравнения аппроксимации $R_{ка} = f(I_{нома})$ для автоматов

Фирма	Аппроксимирующая функция
<i>IEKGROUP</i>	$R_{ка} = 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot I_{нома}^{-2,02} + 1,08$
ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{ка} = 1,99 \cdot I_{нома}^{-2} + 0,08 \cdot I_{нома}^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_{нома}$
АО «КОНТАКТОР»	$R_{ка} = 2,07 \cdot e^{0,02 I_{нома}} \cdot I_{нома}^{-2} - 0,43 \cdot I_{нома}^{-2}$
Курский электроаппаратный завод	$R_{ка} = 1,84 \cdot I_{нома}^{-2} + 0,07 \cdot I_{нома}^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_{нома}$

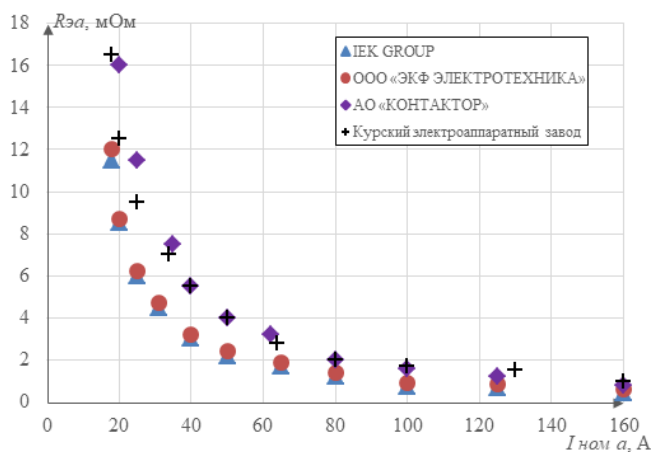


Рис.7. Графики эмпирических зависимостей $R_{ка} = f(I_{нома})$ Fig.7. Graphs of empirical dependencies $R_{ка} = f(I_{нома})$

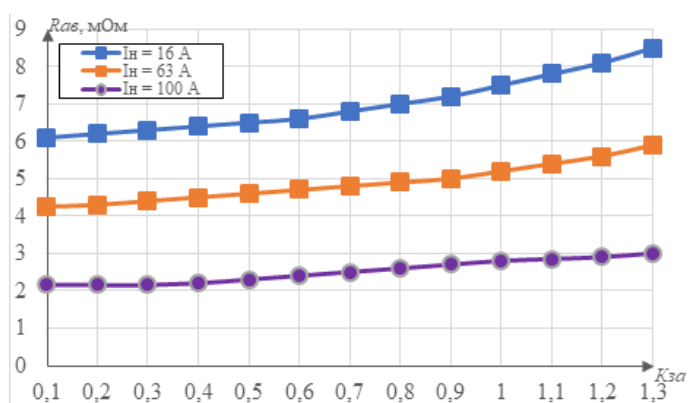


Рис. 8. Графики изменения $R_{ка} = f(K_{за})$ для автоматов с $I_{ном} = 16; 25; 100 A$ Fig. 8. Graphs of changes in $R_v = f(K_z)$ for automata with $I_n = 16; 25; 100 A$

При изменении токовой нагрузки аппарата, согласно экспериментальным исследованиям, сопротивление контактов автоматов увеличивается. Измерения сопротивлений проведены при изменении протекающего тока через контакты от 10% до 130% $I_{ном а}$.

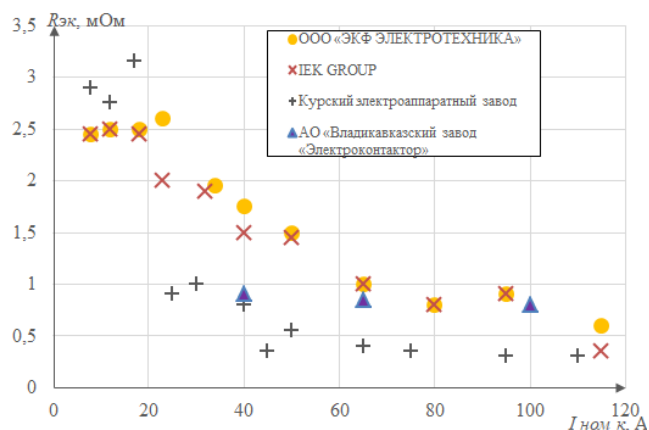


Рис. 9. Графики эмпирических зависимостей $R_{ка} = f(I_{номк})$ Fig. 9. Graphs of empirical dependencies $R_{ка} = f(I_{номк})$

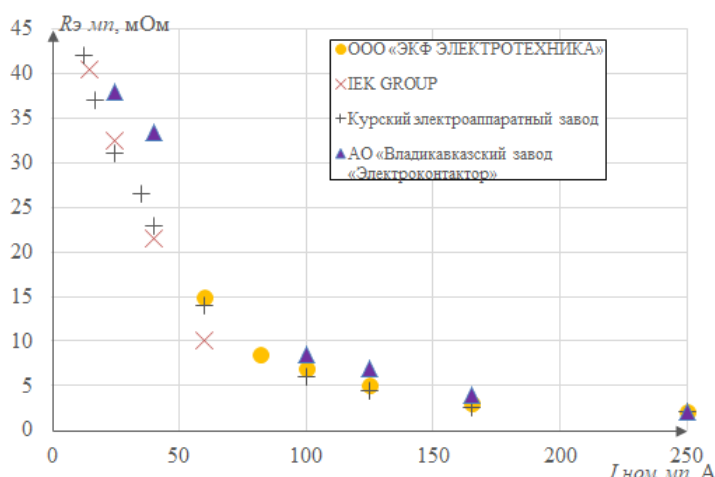


Рис.10. Экспериментальные графики зависимостей $R_{ккн} = f(I_{номкн})$ Fig.10. Experimental dependency graphs $R_{ккн} = f(I_{номкн})$

Далее проведем аппроксимацию эмпирических зависимостей $R_{кк} = f(I_{номк})$ и $R_{ккн} = f(I_{номкн})$ представим полученные уравнения в таблице 5.

Таблица 5

Уравнения аппроксимации $R_{кк} = f(I_{ном})$ и $R_{ккн} = f(I_{номкн})$

Аппараты	Фирма	Аппроксимирующая функция
Контакты	IEK GROUP	$R_{кк} = 4,84 \cdot 10^{-4} \cdot I_{номк}^{-2,01} + 0,06$
	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{кк} = -86,4 \cdot e^{-8,9 \cdot I_{номк}} \cdot I_{номк}^{-2} + 86 \cdot I_{номк}^{-2}$
	АО «Владикавказский завод «Электроконтактор»	$R_{кк} = 0,18 \cdot I_{номк}^{-2} + 0,01 \cdot I_{номк}^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-4} - 4,48 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номк}$
	Курский электроаппаратный завод	$R_{кк} = 1,88 \cdot I_{номк}^{-2} + 0,02 \cdot I_{номк}^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номк}$
Магнитные пускатели	IEK GROUP	$R_{мп} = 6472 \cdot I_{номмп}^{-1,69}$
	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{мп} = -72,1 \cdot e^{-6,5 \cdot I_{номмп}} \cdot I_{номмп}^{-2} + 64 \cdot I_{номмп}^{-2}$
	АО «Владикавказский завод «Электроконтактор»	$R_{мп} = 2,35 \cdot I_{номмп}^{-2} + 0,04 \cdot I_{номмп}^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-4} + 5,14 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номмп}$
	Курский электроаппаратный завод	$R_{мп} = 0,25 \cdot I_{номмп}^{-2} + 0,03 \cdot I_{номмп}^{-3} - 7,7 \cdot 10^{-4} + 5,12 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номмп}$

Полученные уравнения аппроксимации (табл. 4 и 5) позволяют достаточно быстро оценивать значения сопротивлений контактов для аппаратов с различными номинальными токами. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют выявить хорошую сходимость результатов расчетов и данных экспериментов определения сопротивлений аппаратов (рис. 6 и табл. 4 и 5). При наличии полученной в работе информации возможно создание универсальных моделей, которые будут отличаться различной степенью точности, для всех типов низковольтной аппаратуры. Всесторонний учет максимального числа факторов позволит повысить достоверность оценок параметров оборудования при моделировании. Выявленные зависимости сопротивлений аппаратов от номинального тока рекомендуются для вычисления значений эквивалентных сопротивлений электрических сетей низкого напряжения, которое используется для оценки величины потерь электроэнергии. При этом возможно более эффективное планирование мероприятий по энергосбережению. Уточнение значений потерь в низковольтных сетях позволяет оперативно управлять производственными процессами и режимами работы электрооборудования систем электроснабжения, а также контролировать техническое состояние электроустановок. Разработка математических моделей, алгоритмов и

аналитических зависимостей при отсутствии реальных данных, необходима для повышения эффективности эксплуатации оборудования. Анализ потребления электроэнергии с выделением достоверной величины потерь является особенно важным для электротехнических комплексов, т.к. доля электроэнергии в величине эксплуатационных расходов может быть значительной.

Заключение

Теоретический анализ технических параметров низковольтной аппаратуры и данные экспериментов позволяют предложить в качестве одного из критериев энергоэффективности аппаратов значение потерь мощности в контактах и сопротивлений контактных групп. Использование предлагаемого критерия позволяет выявить наиболее эффективные в эксплуатации типы оборудования. При этом для более точной оценки соотношения «цена-качество» необходим детальный анализ дополнительных технических характеристик аппаратов и учет основных эксплуатационных факторов. Исследования в данном направлении планируется продолжить.

Разработанные аппроксимирующие функции сопротивлений контактных систем аппаратов от номинального тока некоторых заводов-изготовителей позволяют анализировать величину потерь мощности и электроэнергии в оборудовании и повышают достоверность оценки уровня потерь электроэнергии во внутризаводских системах электроснабжения и электротехнических комплексах.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
2. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2021. № 1. С.93-104.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
5. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С.65-74.
6. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Оценка потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 4 (13). С. 38-50
7. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., и др. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2021. № 3. С.3-13.
8. Варнавский К.А., Матвеев В.Н. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2016. № 4. С. 14–18.
9. Гайилов Т.Ш., Эшонкулов Э.Б., Айтбаев Н.А. Эквивалентность поиска оптимальных значений регулируемых параметров при минимизации потерь мощности в электрических сетях // Точная наука. 2018. № 31. С. 15–18.
10. Власюк И.В., Парамонов С.Ю., Белов С.И. Повышение эксплуатационной надежности автоматических выключателей в сетях напряжением 0,4 кВ, используемых в агропромышленном комплексе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 1. С. 51–58.
11. Егоров Е.Г., Иванова С.П., Луия Н.Ю., Афанасьев А.В. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15.
12. Колодяжный В.В. Возможности современных автоматических выключателей // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 1. С. 43–49.
13. Feizifar B., Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2019. V. 27, Iss. 3. P. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
14. Lei C., Tian W., Zhang Y., Fu R. [et al.]. Probability-based circuit breaker modeling for

power system fault analysis // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017. P. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.

15. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller / Afrakhte H., Bayat P. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016 4.2016 pp. 24-31.

16. Lin X., Lei Y., Zhu YA. Novel Superconducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. Electric Power Systems Research. 2018. T. 162. C. 64-73.

17. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet Sun Q., Zhang Y., Ma D., Zhang H., He H. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid 8 (3), pp. 1195-1210.

18. Smart Power Grids - Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

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

Горлов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение» Юго-Западного государственного университета, г. Курск.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Табачникова Татьяна Владимировна – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электро- и теплоэнергетики» Альметьевского государственного нефтяного института, г. Альметьевск.

Шумихина Ольга Александровна – студентка, Казанского государственного энергетического университета.

Гибадуллин Рамил Рифатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

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

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

3. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, et al. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of the intra-factory power supply. *Energy problems*. 2021;1:93-104.

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

5. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and evaluation of energy savings in intra-plant power supply systems. *Energy problems*. 2020;2:65-74.

6. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Estimation of electric power losses in intra-factory electric networks. *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Osimi*. 2019;4 (13):38-50.

7. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Gorlov AN, et al. Influence of low-voltage electrical devices and electrical equipment parameters on electricity losses in shop networks. *Problems of power engineering*. 2021;3:3-13.

8. Varnavsky KA, Matveev VN. Analysis of ways to improve the efficiency of operation of power supply systems of industrial enterprises. *Promyshlennaya energetika*. 2016;4:14-18.

9. Gayibov TSh, Eshonkulov EB, Aitbayev NA. Equivalence of searching for optimal values of regulated parameters when minimizing power losses in electric networks. *Exact science*.

10. Vlasyuk IV, Paramonov SYu, Belov SI. Improving the operational reliability of circuit breakers in networks with a voltage of 0.4 kV, used in the agro-industrial complex. *International Technical and Economic Journal*. 2018;1:51-58.

11. Egorov EG, Ivanova SP, Luiya NYu, Afanasyev AV, et al. Investigation of the breaking capacity of automatic circuit breakers in the short-circuit mode. *Electrical engineering*. 2018;8:12-15.

12. Kolodyazhny VV. Possibilities of modern automatic circuit breakers. *Power plants and technologies*. 2016;2(1):43-49.

13. Feizifar B, Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2019;27(3):1982–1997. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.

14. Lei C, Tian W, Zhang Y, Fu R, et al. *Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017. pp. 979–984. doi: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.

15. Afrakhte H, Bayat P. *Energy management system for smart house with multi-sources using Pi-Ca controller*. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG. 2016. 4. pp. 24-31.

16. Lin X, Lei Y, Zhu Y. A Novel Superconducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. *Electric Power Systems Research*. 2018;162:64-73/

17. Zhang Q., Ma D., Zhang H. *A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet Sun*. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid 8. 2017 (3):1195-1210.

18. Smart Power Grids - Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009 г.

Authors of the publication

Edward Y. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Energy University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Gorlov – South-West State University, Kursk.

Zumeyra M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University.

Tatyana V. Tabachnikova – Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk.

Olga A. Shumikhina – Kazan State Energy University.

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Energy University.

Получено

10.12.2021 г.

Отредактировано

13.12.2021 г.

Принято

14.12.2021 г.



АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Арестова¹ А.Ю., Ульянов^{2,3} В.Н., Фролов¹ М.Ю.

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

²ООО «Новосибирский научно-технический центр», г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-6486-4858>, arestova@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5748-4216>, vulyanov@nntc.pro

<https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, m.frolov@corp.nstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть особенности системы электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса. Разработать алгоритм формирования баланса электроэнергии для расчета доли потребления каждым из технологических процессов, анализа потерь мощности и определения причин небаланса. Адаптировать метод параметрической идентификации вращающихся электрических машин в эксплуатационных режимах для дальнейшей оценки показателей энергоэффективности. Встроить принцип адресности в алгоритм расчета удельного расхода электроэнергии оборудования. Разработать визуализацию прототипа программного обеспечения для мониторинга и контроля показателей энергоэффективности нефтегазодобывающего предприятия. *МЕТОДЫ.* Задача формирования математической модели решается методами идентификации параметров оборудования по замерам режимных параметров. Для расчета установившегося режима применяется метод узловых напряжений с формированием системы уравнений и матрицы адресности для трассировки потоков мощности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье предложен алгоритм расчета показателей энергоэффективности оборудования нефтегазодобывающего предприятия. Алгоритм основан на обработке и анализе фактических данных от установленных на предприятии средств учета электропотребления. Анализ данных электропотребления на месторождении в совокупности с показателями добычи нефти, позволит выявить наиболее эффективный режим работы оборудования. Алгоритм расчета удельного расхода электроэнергии рассмотрен на примере типовой иерархии приборов учета на месторождении с детальным описанием процедуры распределения потребляемой электроэнергии между агрегатами. Далее в статье рассмотрена возможность применения принципа адресности потокораспределения в задачах снижения потерь мощности в сети. Представлена методика идентификации параметров схемы замещения оборудования для оценки энергоэффективности и контроля режимных параметров с указанием проблемных узлов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Рассмотренный в статье алгоритм внедрен в информационную систему центра управления добычей на месторождении как дополнительный модуль по оценке энергоэффективности. Отклонение фактических значений показателей от нормативных является индикатором нарушений в работе оборудования. Выявление отклонений позволяет сформировать оптимальный список организационных и технических мероприятий по регулированию электропотребления и повышению энергоэффективности предприятия.

Ключевые слова: анализ; оптимизация; система электроснабжения; поддержка принятия решений; нефтяное оборудование; показатели энергоэффективности.

Для цитирования: Арестова А.Ю., Ульянов В.Н., Фролов М.Ю. Алгоритм расчета показателей энергоэффективности оборудования нефтегазодобывающего предприятия // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 16-28. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-16-28.

THE CALCULATION ALGORITHM OF OIL AND GAS PRODUCTION ENTERPRISE ENERGY EFFICIENCY INDICATORS

AYu. Arestova¹, VN. Ulyanov^{2,3}, MYu. Frolov¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²LLC “Novosibirsk Research and Development Center”, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-6486-4858>, arestova@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5748-4216>, vulyanov@nntc.pro

<https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, m.frolov@corp.nstu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The main purpose of the study is to develop the calculation algorithm of energy efficiency indicators. To develop an algorithm, it is necessary to consider the features of the power supply system of the oil and gas production enterprise. Then, the power and electricity balance calculation algorithm should be designed to evaluate the share of the technological processes' consumption, analyze losses, and determine the source of imbalance. The assessment of energy efficiency indicators will require adaptation of the parameter's identification method for rotating electrical machines in operating modes. To calculate the specific equipment energy, it is necessary to use power tracing in the algorithm. The final stage is to develop a visualization of a software prototype for monitoring and control energy efficiency indicators of an oil and gas production enterprise. *METHODS.* The equipment parameters identification method based on actual measurements is used for designing a mathematical model. To calculate the steady-state, the nodal-voltage method is used in couple with an addressing matrix for tracing power flows. *RESULTS.* The paper proposes an algorithm for calculating energy efficiency indicators of equipment for an oil and gas production enterprise. The algorithm is based on the processing and analysis of actual data from the electricity metering devices installed at the enterprise. Analysis of the power consumption information together with the oil production indicators will reveal the most efficient operating mode of the equipment. The calculating algorithm for the specific electricity consumption is considered in the example of a typical hierarchy of metering devices at a field. Further, the paper discusses the possibility of applying the targeting flow distribution principle for reducing power losses. A parameters identification technique is presented for multi equipment nodes to assess energy efficiency and monitor operating parameters. *CONCLUSION.* The algorithm considered in the paper was introduced into the information system of the production control center at the field as an additional module for assessing energy efficiency. The large deviation of the indicator's values from the specified ones is messaging about the equipment's normal mode violations. It allows creating an optimal schedule of organizational and technical measures to regulate energy consumption and improve the energy efficiency of the enterprise.

Keywords: analysis; optimization; power supply system; decision support; oil equipment; energy efficiency indicators.

For citation: Arestova AYu, Ulyanov VN, Frolov MYu. The calculation algorithm of oil and gas production enterprise energy efficiency indicators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):16-28. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-16-28.

Введение и литературный обзор

Нефтегазовый комплекс (НГК) России играет важную роль в экономическом развитии страны. Между тем, история развития и становления НГК в России насчитывает почти 150 лет, а запасы ископаемого сырья имеют тенденцию к снижению. Однако основные направления перспективного развития НГК, отраженные в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035, требуют ускоренного развития освоения месторождений и стабилизацию объема добычи нефти. В связи с чем, для обеспечения требуемого уровня добычи и сохранения рентабельности, нефтегазодобывающие компании вынуждены направлять значительные ресурсы на оптимизацию производства, разработку и осуществление мероприятий по повышению энергоэффективности блока разведки и добычи. Сдерживанию роста затрат в добывающих отраслях будет способствовать реализация концепций «интеллектуальная скважина» и «интеллектуальное месторождение».

Концепция «интеллектуального месторождения» основана на использовании

автоматизированных систем управления технологическим, энергетическим, транспортным и производственным процессами. Концепция включает следующие этапы интеллектуализации [1]:

- сбор информации по всем имеющимся датчикам системы телеметрии,
- интеграция данных замеров по всем процессам в единой информационной системе (бурение, добыча, электроснабжение, транспорт и пр.),
- обработка, анализ и визуализация текущих показателей работы оборудования,
- выполнение функции экспертной системы поддержки принятия решений для технических специалистов,
- автоматизированное планирование всех видов мероприятий на производстве,
- интегрированное моделирование текущего состояния актива с возможностью оперативного расчета влияния операционной деятельности на профиль добычи.

Для полноценной реализации сквозного процесса в рамках «интеллектуального месторождения» все ключевые объекты на месторождении должны быть оснащены датчиками, а данные с них должны оперативно передаваться в единую информационную систему. Также требуются программные продукты для поддержки принятия управленческих решений и, самое главное, интеграция результатов в едином информационном пространстве. Авторы [2] представляют «интеллектуальный» нефтепромысел как систему оперативного управления производственными процессами. Приводят схему консолидации данных системы мониторинга и адаптивного управления разработкой «интеллектуального» нефтепромысла. Внедрение такой системы позволит, в результате увеличить коэффициент извлечения углеводородов, увеличить общий объем добычи и снизить операционные затраты.

На данный момент практически все этапы интеллектуализации в той или иной мере реализованы на месторождениях, например:

- идентификация и интерпретация результатов исследований интеллектуальных скважин [3],
- управление рисками и оптимизация затрат при бурении [4],
- контроль состояния и производительности оборудования [5],
- управление транспортными потоками [6],
- сокращение простоев оборудования [7], и др.

Однако, зачастую, отсутствует взаимный анализ информации в разных областях деятельности производства. Таким образом, оптимизация возможна внутри каждого блока, но не процесса целиком. Так, например, анализ данных электропотребления на месторождении в совокупности с показателями добычи нефти, позволит выявить наиболее эффективный режим работы оборудования. Однако автоматизированные системы учета электроэнергии установлены, как правило, на кустовых площадках и не позволяют анализировать рентабельность функционирования каждой скважины в отдельности и уж тем более эффективность конкретной единицы оборудования. В связи с чем, невозможно определить наиболее значимые меры в вопросе повышения эффективности работы месторождения. Для решения таких задач необходимо построение математической модели и формулирование аналитических зависимостей в случае дефицита реальных данных. Задача анализа режима электропотребления оборудования также важна по причине того, что доля электроэнергии в эксплуатационных расходах на месторождении может достигать 70%. Очевидно, что оптимизация этих затрат должна стать одной из первых задач в вопросе повышения эффективности.

Вопросу цифровых двойников на месторождении посвящено множество научных исследований [8-12]. В настоящей статье представлена методика оценки и минимизации электропотребления нефтегазового актива. Оценка электропотребления предполагает анализ информации от существующих средств учета на месторождении совместно с математическим моделированием электрооборудования. Задача повышения наблюдаемости сетевых объектов решается с помощью принципов адресного распределения потоков. Задача формирования математической модели решается методами идентификации параметров оборудования по замерам режимных параметров. На базе сформированной математической модели возможно решение следующих задач:

- оперативный контроль отклонений добычи с указанием проблемных узлов;
- прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от плановой добычи флюида;
- оценка текущих затрат на электроэнергию по скважинам и их минимизация при сохранении объема добычи.

Материалы и методы

Контроль энергоэффективности месторождения основан на анализе удельного расхода электроэнергии (УРЭ), который отражает энергоемкость производства при фактических и плановых показателях затрат электроэнергии на добычу жидкости

механизированным способом. УРЭ для каждого типа оборудования может быть рассчитан как отношение объема жидкости к объему потреблённой электроэнергии. На каждом месторождении предусмотрено две системы учета электроэнергии:

- коммерческий учет электроэнергии и мощности с целью осуществления расчетов с поставщиком электроэнергии,
- технический учет электрической энергии.

Приборы учета электроэнергии на месторождении могут быть расположены на питающих подстанциях, отходящих фидерах и непосредственно в точках присоединения потребителей. Проблема наблюдаемости распределения потоков мощности заключается в том, что количество приборов учета на месторождении несоизмеримо меньше количества оборудования, требующего контроля эффективности. Пример иерархии приборов учета на месторождении представлен на рисунке 1.

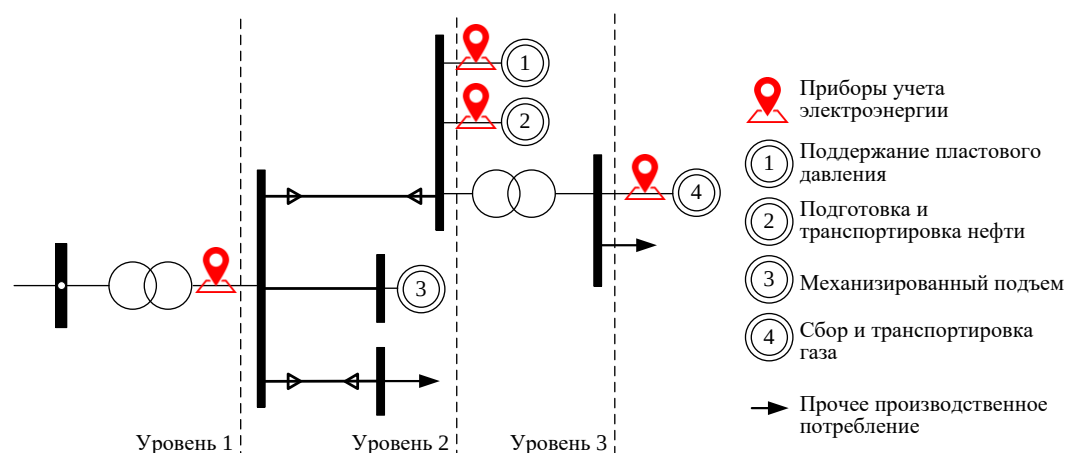


Рис. 1. Иерархия приборов учета на месторождении

Fig. 1. Hierarchy of metering devices

Как видно из рисунка, прямых измерений недостаточно для оценки УРЭ, формирования баланса электроэнергии и анализа потерь мощности [13]. Помимо неопределенности распределения мощности по отходящим присоединениям, существуют основные технологические процессы, которые требуют оценку УРЭ.

В связи с этим существует алгоритм распределения электроэнергии, который позволяет:

- определить величину потребления электроэнергии каждым из технологических процессов (подпроцессов);
- определить величину потерь электроэнергии в сетях и распределить эти потери по технологическим процессам (подпроцессам) пропорционально величине потребления каждого процесса (подпроцесса);
- вычислить небаланс в узлах учета и контролировать величину этого небаланса;
- выявить причину полученного небаланса.

Исходными данными для распределения энергии является перечень всех приборов учета с указанием параметров: номер счетчика, тип счетчика, месторождение, подстанция, ячейка, и прочее. Для каждого прибора учета указывается вышестоящий прибор для формирования иерархии.

Приборы учета, установленные непосредственно в месте присоединения потребителей, могут быть привязаны к одному или нескольким технологическим подпроцессам. Если учитывается потребление одного подпроцесса, то 100% потребления относится на этот подпроцесс. В случае одновременного учета потребления несколькими подпроцессами, указываются доли потребления каждого из них. Потребление отдельного подпроцесса так же может задаваться в виде фиксированной величины. Аналогичное распределение осуществляется для узлов с несколькими однотипными единицами оборудования.

Ниже представлен общий алгоритм распределения энергии:

1. Сбор показаний всех приборов учета и расчет объема потребления по присоединениям, не оснащенным приборами учета.
2. Для приборов учета на самом нижнем уровне иерархии, расположенных в точках присоединения потребителей, производится отнесение вычисленного потребления на тот или иной технологический подпроцесс.

3. Для приборов учета, расположенных в промежуточных точках, имеющих нижестоящие приборы учета, и одновременно с этим учитывающих непосредственное потребление одного или нескольких технологических процессов (имеющих непосредственно присоединенных потребителей), сначала вычитается потребление нижестоящих приборов учета. Далее, полученный остаток распределяется на заданные процессы с учетом их доли потребления.

4. Для приборов учета, расположенных выше в иерархии, вычисляется небаланс между потреблением по данному прибору учета, и суммарным потреблением всех приборов учета, расположенных на отходящих присоединениях (нижестоящих приборов учета). В зависимости от места установки прибора учета, полученное значение учитывается следующим образом:

4.1. Для приборов учета в сетях напряжением 35-110 кВ полученная величина небаланса относится на распределяемые потери пропорционально на все технологические процессы. При этом относительная величина распределяемых потерь не должна превышать нормативные (при наличии), либо среднестатистические потери за последние полгода. Превышение нормативной величины является индикатором нарушения технологического процесса или процедуры учета электроэнергии

4.2. Для приборов учета в сетях напряжением 6(10) кВ полученная величина должна быть разделена на две составляющих:

- нормативные потери, определяемые по заданному для каждого месторождения проценту потерь (по результату аудита).
- сверхнормативные потери (остаток от полученного небаланса за вычетом нормативных потерь). Увеличение доли сверхнормативных потерь может сигнализировать о физическом износе оборудования и других нарушениях технологического процесса.

5. После окончания расчета вычисляются суммарные показатели:

- потери на разных классах напряжения,
- потребление каждого подпроцесса,
- суммарный небаланс.

В таблице 1 представлены основные процессы на месторождении и алгоритм их расчета для оценки УРЭ на основании установленных приборов учета.

Таблица 1

Алгоритм расчета потребления энергии по основным технологическим процессам

Процесс	Подпроцесс	Алгоритм расчета	
		Прямые замеры	Расчетные значения
Механизированная добыча	Установка электроцентробежного насоса		✓
	Газлифт		✓
	Установка штангового глубинного насоса		✓
Поддержание пластового давления	Блочная кустовая насосная станция	✓	
	Высоконапорные насосы	✓	✓
	Подъем и подача воды	✓	✓
Подготовка и транспорт нефти	Подготовка нефти	✓	
	Внутрипромысловый транспорт		✓
	Дожимная насосная станция	✓	
	Установка предварительного сброса воды	✓	
	Кустовая насосная станция	✓	
Сбор и транспорт попутного газа		✓	
Прочее производственное потребление			✓
Собственные нужды кустовых площадок			✓
Потери в сетях 6(10) кВ			✓
Распределяемые потери в сетях 35-110 кВ			✓

Формирование баланса электроэнергии усложняется, если источников питания несколько. Электрическая энергия на месторождении может быть закуплена от сторонних источников, как это показано на рисунке 1, либо сгенерирована на собственной станции. В качестве топлива для собственной станции выступает попутный нефтяной газ,

природный газ и дизельное топливо. Распределение потоков энергии по процессам представлено на рисунке 2 в виде диаграммы Санкей.

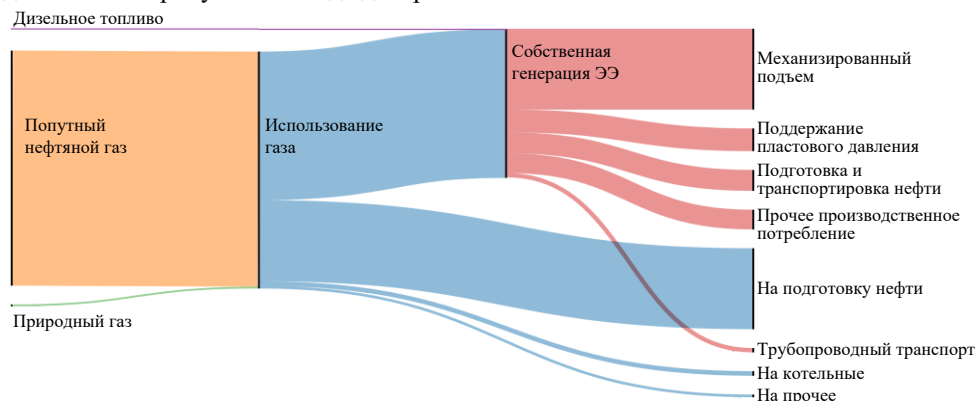


Рис. 2. Типичная диаграмма распределения потоков энергии по процессам на нефтегазодобывающем предприятии

Fig. 2. A typical diagram of energy flows distribution by processes for an oil and gas production enterprise

Определение доли участия нескольких источников питания в формировании баланса энергии, а также оценка затрат на электроэнергию возможна с применением принципа адресности [14]. Адресное потокораспределение предусматривает трассировку потоков мощности в электрической сети. Для оценки трасс потребуется достоверная математическая модель системы, нагрузки в узлах и их суточные графики, характеристики электростанций и внешних поставщиков электроэнергии. Адресные расчеты позволяют определить долю участия каждого из поставщиков электроэнергии в снабжении конкретного потребителя, а также поток мощности от каждого генератора по ветвям схемы. Полученная информация может быть использована в решении следующих задач:

- определение потерь в сети, вызванных каждым из нагрузочных узлов;
- определение дополнительных потерь, вызванных транзитом мощности;
- анализ эффективности установки компенсирующих устройств (при трассировке реактивной мощности в сети);
- формирование тарифа по обслуживанию электрических сетей и прочее.

В настоящей работе предлагается использовать принцип адресности для расчета потерь мощности в сети от каждого из потребителей и определения узловых цен для дальнейшей оценки УРЭ. Расчет проводится в три этапа:

1. Расчет потокораспределения для каждого интервала времени по реальным замерам или расчетным значениям.
2. Построение финансовой модели на основе финансовых балансов в узлах и ветвях ЭЭС. В результате составляется система линейных уравнений или графовая модель.
3. Решение системы уравнений и определение узловых цен.

Каждый узел схемы замещения рассматривается как рынок, где втекающий поток является продавцом и имеет свою цену, а вытекающий поток представлен покупателем. Зная цену мощности в узле и объем потребляемой мощности, можно рассчитать стоимость вытекающих из узла потоков мощности. Для каждой ветви может быть записан баланс стоимостей перетоков в начале и в конце ветви. При этом стоимость перетока в конце каждой ветви увеличивается на величину потерь мощности в данной ветви.

Для определения мощностей, переданных из генераторных узлов в нагрузочные, формируется матрица адресности, столбцы которой соответствуют генераторным узлам, а элементы столбцов показывают мощность, передаваемую в нагрузочные узлы. Матрица адресности может быть сформирована следующим образом:

$$A = (MP_{\text{вет}} + P_{\text{нагр}})^{-1} P_{\text{Г}}$$

где M – матрица инцидентий, число строк и столбцов которой равны числу узлов и ветвей в графе сети; $P_{\text{вет}}$, $P_{\text{Г}}$, $P_{\text{нагр}}$ – диагональные матрицы потока активной мощности в ветвях, мощности генерации и нагрузок в узлах.

Элементы матрицы, расположенные на пересечении строк (нагрузочный узел) и столбцов (узел генерации) соответствуют коэффициентам адресности и показывают долю мощности нагрузочного узла, которую он получает из соответствующего генераторного узла.

Если нагрузочный узел получает мощность от нескольких генераторов, то стоимости переданной электроэнергии суммируются. Цена электроэнергии в нагрузочном узле может быть получена как отношение стоимости электроэнергии, переданной в узел, к мощности нагрузки в этом узле.

Таким образом, имея суточные графики нагрузки для отдельного оборудования или узла нагрузки в целом можно рассчитать УРЭ в суточном диапазоне. На основании расчетов можно построить динамику изменения УРЭ для дальнейшего анализа эффективности работы оборудования. Данные формируются как для отдельного оборудования, так и для технологических процессов в целом. Значительные отклонения УРЭ от нормативных значений (при наличии) или статистических данных является сигналом для проведения мероприятий по повышению энергоэффективности и поиска неисправностей оборудования. Такими мероприятиями могут выступать: оптимизация загрузки оборудования, перевод оборудования в режим кратковременной и периодической эксплуатации, оптимизация напряжения в узлах, внедрение оборудования с повышенным КПД и прочее [15-16].

Для определения факторов, влияющих на электропотребление оборудования при добыче нефти, необходимо провести анализ нескольких потоков данных: объем электропотребления, суточный график работы оборудования, объем перекачиваемой жидкости. Помимо этого, режим работы двигателей будет зависеть от напряжения в узле подключения, условий эксплуатации, износа, общего КПД установки, давления жидкости и прочего [17]. Полноценное моделирование всех влияющих на процесс факторов невозможно. Однако, имея прямые замеры режимных параметров можно применить методы идентификации параметров схемы замещения основного оборудования, а затем, на основании полученных данных, провести анализ эффективности оборудования. Оценка эффективности осложняется тем, что в одном нагрузочном узле может быть несколько единиц оборудования. При этом оборудование может быть, как однотипным с различными рабочими характеристиками, так и разнотипным, следовательно, иметь различные схемы замещения и протекающие в них процессы. В таком случае идентификация параметров должна учитывать доли участия каждого объекта в общем объеме нагрузки и их суточные графики.

Смешанный узел нагрузки имеет синхронную, асинхронную, активную и индуктивную составляющие. Чтобы полноценно идентифицировать параметры каждого элемента, потребуется размещение измерительных комплектов на каждом питающем фидере. В реальных условиях эксплуатации измерительные устройства находятся только на самых мощных и ответственных двигателях. Следовательно, достоверная идентификация возможна только на отдельных объектах. Параметры остальных потребителей можно определить в эквивалентированном виде. Применительно к рисунку 1, можно сформировать два объекта идентификации: синхронный двигатель и смешанный узел нагрузки (рис. 3).

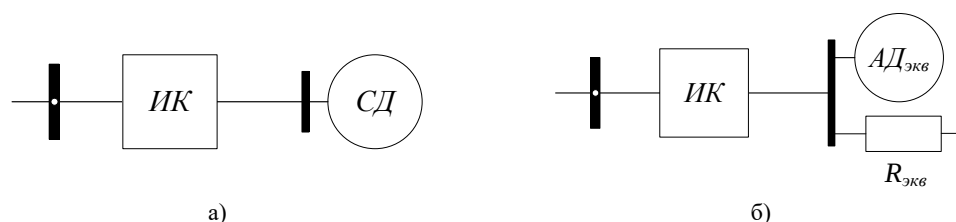


Рис. 3. Схема измерения режимных параметров нагрузки а) синхронного двигателя; б) смешанного узла нагрузки (ИК- измерительный комплект, СД – синхронный двигатель, АД_{экв} – эквивалентный асинхронный двигатель, R_{экв} – эквивалентное активное сопротивление)

Fig. 3. The operating parameters measurement design for a) synchronous motor, b) mixed load (including measuring kit, synchronous motor, equivalent asynchronous motor, equivalent resistance)

Для задач, описанных выше, синхронную машину достаточно представить схемой замещения установившегося режима (рис. 4а). В таком случае математическая модель будет состоять из одного общеизвестного классического уравнения:

$$E_q = \sqrt{\left(U_{cd} - \frac{Q_{cd} x_d}{U_{cd}} \right)^2 + \left(\frac{P_{cd} x_d}{U_{cd}} \right)^2}$$

где E_q – ЭДС генератора, $U_{сд}$ – напряжение на шинах синхронного двигателя, $Q_{сд}$ – реактивная мощность на шинах синхронного двигателя, $P_{сд}$ – активная мощность на шинах синхронного двигателя, x_d – синхронное индуктивное сопротивление синхронного двигателя.

Данное уравнение устанавливает связь между режимными параметрами, ЭДС и сопротивлением машины. Напряжение и мощность являются измеряемыми величинами. ЭДС синхронного двигателя рассчитывается по известным значениям тока возбуждения. Неизвестным является только одно значение – сопротивление x_d . Повысить точность идентификации можно повторяя измерения при различных режимах работы и определяя среднее между ними значение.

В свою очередь смешанный узел нагрузки будет представлен схемой замещения, изображенной на рисунке 4 б).

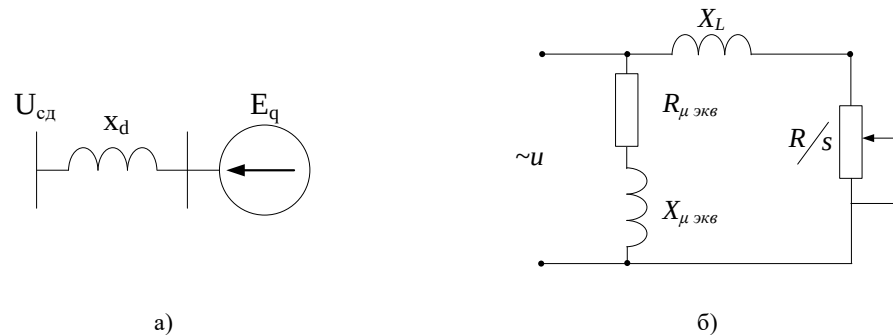


Рис. 4. Схема замещения а) синхронного двигателя; б) смешанного узла нагрузки (E_q – ЭДС генератора, x_d – синхронное индуктивное сопротивление синхронного двигателя, $U_{сд}$ – напряжение на шинах синхронного двигателя, R/s – сопротивление моделирующее нагрузку асинхронного двигателя, s – скольжение ротора, X_L – сопротивление рассеяния статора и ротора, $R_{\mu экв}$ – эквивалентное активное сопротивление ветки намагничивания и активной нагрузки, $X_{\mu экв}$ – эквивалентное реактивное сопротивление ветки намагничивания и реактивной нагрузки)

Fig. 4. Equivalent circuit a) synchronous motor; b) mixed load (E_q – generator EMF, x_d – reactance of a synchronous motor, $U_{сд}$ – synchronous motor voltage, R/s – induction motor resistance, s – rotor slip, X_L – dissipation resistance, $R_{\mu eq}$ – equivalent resistance of the magnetizing branch and active load, $X_{\mu eq}$ – equivalent reactance of the magnetizing branch and reactive load)

Параметры схемы замещения смешанного узла нагрузки определяются при пуске двигателя, во время которого можно выделить два особых режима. В первый момент времени ротор неподвижен, из чего следует, что скольжение равно единице, поэтому ток, протекающий по ветви содержащий сопротивления X_L и R/s , много меньше тока ветви намагничивания. Данный режим аналогичен опыту короткого замыкания. После завершения переходных процессов, связанных с пуском двигателя, возникнет установившийся режим работы на холостом ходу. При этом скольжение будет стремиться к нулю, тогда можно допустить, что весь ток будет замыкаться по ветви намагничивания. Схема замещения для двух режимов работы представлены на рисунке 5.



Рис. 5. Схемы замещения смешанного узла нагрузки а) в момент коммутации б) в установившемся режиме

Fig. 5. Equivalent circuit of a mixed load a) at start b) in a steady-state

Имея действующие значения токов, напряжений и мощности в начальный момент времени (в формулах с индексом кз) и в установившемся режиме (в формулах с индексом

xx) можно рассчитать параметры через выражения, полученные на основе законов Ома и Джоуля-Ленца.

$$Z_{\mu} = \frac{U_{ad\ xx}}{\sqrt{3}I_{xx}}$$

$$X_{\mu\ экв} = \sqrt{Z_{\mu\ экв}^2 - R_{\mu\ экв}^2}$$

$$R = \frac{P_{ад\ кз}}{3I_{кз}^2}$$

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U_{ад\ кз}}{\sqrt{3}I_{кз}}\right)^2 - R_L^2}$$

Рассчитав параметры схемы замещения включенного оборудования, можно построить математическую модель системы электроснабжения. Анализ эффективности работы оборудования основан на следующих показателях [18]:

1. Фактическая потребляемая мощность

$$N_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{\tau}$$

где W_{ϕ} – фактическая потребленная электроэнергия агрегатом, кВтч, τ – время наработки агрегата, ч

2. Фактический удельный расход электроэнергии

$$w_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{V_{\phi}}$$

где V_{ϕ} – фактический объем закаченной жидкости, м³,

3. Фактический КПД оборудования

$$\Theta = \frac{w_{норм}}{w_{\phi}}$$

где k_{η} – коэффициент, учитывающий износ агрегата за срок эксплуатации, N_n – полезная мощность агрегата, кВт, $\eta_{дв}$ – КПД двигателя, определяемый по паспортным данным.

4. Текущая энергоэффективность

$$\Theta = \frac{w_{норм}}{w_{\phi}}$$

где $w_{норм}$ – нормативный удельный расход электроэнергии.

Отклонение фактических значений показателей от нормативных является индикатором нарушений в работе оборудования. После выявления значительных отклонений показателей необходимо провести организационные и технические мероприятия по регулированию электропотребления, например: изменение графика и режима работы электроприемников, координация работы однотипных агрегатов, выполнение капитальных и средних ремонтов, замена оборудования и прочие [19].

Результаты

Предложенный алгоритм оценки показателей энергоэффективности был реализован как дополнительный блок в симуляторе технологических процессов на нефтегазодобывающем предприятии – *PIFA.framework* (ООО «ННТЦ»). *PIFA* является платформой для создания и управления цифровым динамическим двойником нефтегазодобывающего актива. Прототип блока оценки энергоэффективности разработан для Романовского месторождения, включающего 51 куст и 243 скважины. Питание оборудования осуществлено от четырех подстанций 35/6 кВ, суммарная протяженность воздушных и кабельных линий 6 кВ составляет более 100 км, совокупная установленная мощность оборудования 60 МВА, общее количество двигательной нагрузки – 154 шт. Двигательная нагрузка подключена на 6 кВ и 0,4 кВ. Доступные средства технического учета электроэнергии установлены на подстанции ТЗРУ «Романовская». Счетчики установлены на выводах синхронных и асинхронных двигателей, относящихся к технологическому процессу «Подготовка и транспорт нефти» и осуществляющих: подготовку нефти, внутрипромысловый транспорт нефти и подтоварной воды, сбор и

транспорт газа, закачку насосами кустовой насосной станции. Визуализация программного модуля на примере Романовского месторождения представлена на рисунке 6. Общий дашборд по электроэнергии показывает УРЭ по месторождению и отдельным подпроцессам (текущий и плановый).

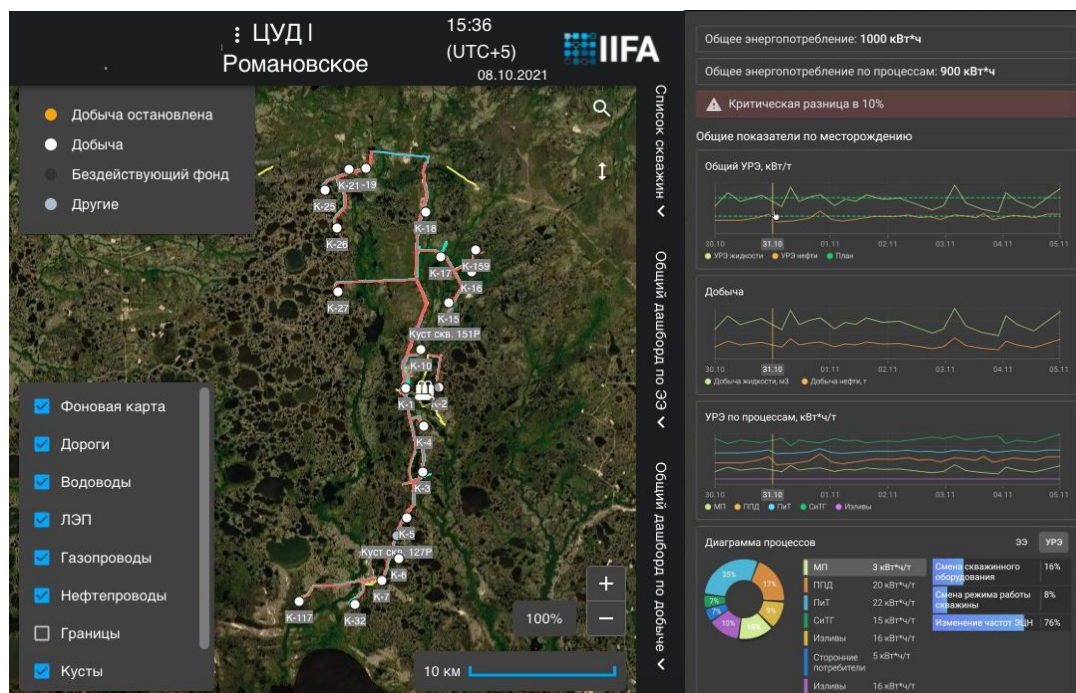


Рис. 6. Программная реализация блока оценки энергоэффективности Fig. 6. Software implementation of energy efficiency assessment module

Диаграмма процессов по месторождению предоставляет информацию о наиболее энергозатратных процессах, а также о проведенных мероприятиях по повышению энергоэффективности. Критическое отклонение текущего УРЭ от планового приводит к соответствующему уведомлению в рабочем пространстве программного модуля.

Исходные данные для построения схемы и графиков процесса помимо автоматизированных систем коммерческого и технического учета электроэнергии, поступают также от следующих программных продуктов:

- OIS Production – учет добычи,
- OIS Pipe – обеспечение информационного сопровождения процесса эксплуатации промысловых трубопроводов,
- АСОДУ – сбор данных с локальных систем автоматизации, контроллеров и датчиков,
- УСОИ – сбор и предоставление оперативной производственной отчетности
- OIS ШТР – сбор информации по режимам работы скважин, контроль отклонений, расчет технологического режима, забойных давлений и потенциалов,
- ГИС - Термо – схемы нефтяных месторождений,
- ЭРА Мехфонд – сбор информации по работе скважин,
- Интегрированный план актива – организационно-технические мероприятия,
- АРМ Механик – планирование и учет технического обслуживания и всех видов ремонтов технологического оборудования,
- Блок «Виртуальный расходомер» – обеспечение информации о добыче скважины.

Плановые показатели по электропотреблению рассчитываются на основе ретроспективной информации по месторождению с учетом поправок на изменение объемов добычи, а также плановых ремонтах оборудования.

Обсуждение

Предложенный алгоритм объединяет в себе существующую практику расчета баланса мощности и энергии на НГК и теоретические подходы, разработанные авторами для повышения точности оценки показателей энергоэффективности и оценки состояния оборудования. Программная реализация алгоритма оценки показателей энергоэффективности на предприятии обеспечивает:

1. Своевременное выявление нерационального потребления энергоресурсов и отклонений «план/факт»;

2. Снижение затрат за счет контроля УРЭ;
3. Выявление оборудования, требующего ремонта, модернизации или замены;
4. Планирование электропотребления с учетом графика добычи нефти;
5. Оценку эффективности технологических процессов в краткосрочной и долгосрочной перспективе;
6. Визуализацию данных в картографическом интерфейсе, включая трубопроводы, кусты, скважины, дороги и объекты подготовки нефти;
7. Отображение на картографическом интерфейсе отказов в работе замерных установок или расхождений их показателей с другими известными данными;
8. Повышение эффективности производства за счет функции помощи принятия решений.

Заключение

Все технологические процессы на предприятиях НГК тесно связаны и должны иметь комплексную оценку показателей энергоэффективности. Оптимизация процессов заключается в минимизации объемов электропотребления при сохранении объемов добычи нефти. Ввиду массовости автоматизации технологических процессов, внедрения «умных» технологий обработки данных и цифровизации месторождений, предприятия нуждаются в специализированной системе интеллектуальной обработки данных с целью увеличения эффективности работы. В настоящей статье представлен блок обработки и анализа данных от измерительных приборов, установленных на предприятиях НГК и вариант его интеграции в автоматизированную систему центра управления добычей.

Литература

1. Пучкина Л.Д. Направления повышения эффективности предприятий нефтегазовой отрасли (ВИНК) // Труды VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве»; 03-04 апреля 2019 г. С. 294.1-294.7.
2. Воробьев А.Е., Хоноре Т., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: интеллектуальный нефтепромысел // Вестник евразийской науки. 2018. №.3 (10). С. 1-16.
3. Сергеев В.Л., Фьонг Н.Т.Х. Модели и алгоритмы адаптивной интерпретации результатов комбинированных газогидродинамических исследований интеллектуальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. №. 10 (329). С. 67-75.
4. Жидков Е.О., Катышева Е.Г. Применение инструментов интеллектуального месторождения для управления рисками и оптимизации затрат при бурении нефтяных скважин // Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы. 2020. С. 98-111.
5. Рясный А.Г., Савенок О.В. Анализ текущего состояния и контроль за разработкой Находкинского месторождения // Материалы V Международной научно-практической конференции Булатовские чтения, 2021. С. 225-233.
6. Ефимова И.Ю., Гусева Е.Н., Варфоломеева Т.Н. и др. Управление транспортными потоками медного месторождения с использованием имитационного моделирования на основе программы АРЕНА // Фундаментальные исследования. 2019. №.3. С. 35-40.
7. Еремин Н.А., Столяров В.Е. О цифровизации процессов газодобычи на поздних стадиях разработки месторождений // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2020. №.1. С. 59-69.
8. Быкова В.Н., Ким Е., Гаджиалиев М.Р. и др. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. №. 1(28). С. 1-11.
9. Wanasinghe TR., Wroblewski L., Petersen BK. et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. С. 104175-104197. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
10. LaGrange E. Developing a digital twin: The roadmap for oil and gas optimization // SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, 3–6 Sept. 2019, Aberdeen, UK, 2019. doi: 10.2118/195790-MS
11. Pinto SC., Villeneuve E., Masson D. et al. Digital twin design requirements in downgraded situations management // 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, June 2021, Budapest, Hungary, 2021. pp. 1-6.
12. Fernandes TL., Baldo CR., Donatelli GD. The concept of digital twin used to investigate geometrical variations in the production of pipe spools // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2021. pp. 1-12. doi: 10.1016/j.aime.2021.100054.
13. Данилов М.И., Романенко И.Г. Оперативный расчет потерь электроэнергии в сети с неизвестными параметрами в АИИС КУЭ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. №22(5). С.116-127.

14. Гамм А.З., Голуб И.И., Батюнин А.В. и др. Узловые средневзвешенные цены на электроэнергию // *Электричество*. 2005. №10. С. 17-24.
15. Wu NQ., Li ZW., Qu T. Energy efficiency optimization in scheduling crude oil operations of refinery based on linear programming // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166. pp. 49-57. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.222.
16. Nguyen TV., Barbosa YM., da Silva JA., et al. A novel methodology for the design and optimisation of oil and gas offshore platforms // *Energy*. 2019, Vol. 185, pp. 158-175. doi: 10.1016/j.energy.2019.06.164.
17. Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. №3(23). С. 95-104.
18. Байкова Л.Р., Гаррис Н.А. Алгоритм расчета показателей энергоэффективности оборудования систем поддержания пластового давления // *Нефтегазовое дело*. 2018. №2(16). С. 61-66.
19. Федоров О.В., Семёнов А.С., Егоров А.Н., и др. Техничко-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. №9(10). С. 91-97.

Авторы публикации

Арестова Анна Юрьевна – старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

Ульянов Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Геофизики Новосибирского национального исследовательского государственного университета, генеральный директор ООО «ННТЦ».

Фролов Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

References

1. Puchkina LD. Napravleniya povysheniya effektivnosti predpriyatii neftegazovoi otrasli (VINK). VIII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: *Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve*; 03-04 April 2019:294.1-294.7
2. Vorobev AE, Tcharo H, Vorobyev KA. Oil industry digitization: «intelligent» oilfield. *The Eurasian Scientific Journal*. 2018; 3 (10):1-16.
3. Sergeev VL, Phuong THN. Models and algorithms for adaptive interpretation of combined well test data of intelligent wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 10(329):67-75.
4. Zhidkov EO, Katysheva EG. Use of intellectual field tools for risk management and optimization of costs during oil wells drilling. *Klasterizatsiya tsifrovoy ekonomiki: Global'nye vyzovy*. 2020:98-111.
5. Ryasny AG, Savenok OV. Analysis of the current status and control of development of the nakhodkinskoe field. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Bulatovskie chteniya*. 2021:225-233.
6. Efimova IYu, Guseva EN, Varfolomeeva TN. Et al. Management of transport flows of copper deposits with the use of imitation modeling based on ARENA program. *Fundamental research*. 2019; 3:35-40.
7. Eremin NA, Stolyarov VE. On the digitalization of gas production in the late stages of field development. *SOCAR Proceedings*. 2020; 1:59-69.
8. Bykova VN, Kim E, Gadzhialiev MR. et al. Application of a digital twin in the oil and gas industry. *Actual Problems of Oil and Gas. Iss.* 2020; 1(28): 1-11. doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8.
9. Wanasinghe TR, Wroblewski L, Petersen BK. et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. С. 104175-104197. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
10. LaGrange E. Developing a digital twin: The roadmap for oil and gas optimization // *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition*, 3–6 Sept. 2019, Aberdeen, UK, 2019. doi: 10.2118/195790-MS
11. Pinto SC, Villeneuve E, Masson D. et al. Digital twin design requirements in

downgraded situations management // 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, June 2021, Budapest, Hungary, 2021. pp. 1-6.

12. Fernandes TL, Baldo CR, Donatelli GD. The concept of digital twin used to investigate geometrical variations in the production of pipe spools // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2021. pp. 1-12. doi: 10.1016/j.aime.2021.100054.

13. Danilov MI, Romanenko IG. Operative calculation of electric power losses in the network with unknown parameters in AIMS EMA. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(5): 116-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-116-127. (In Russ).

14. Gamm AZ, Golub II, Batyunin AV. et al. Uzlovye srednevzveshennye tseny na elektroenergiyu. *Elektrichestvo*. 2005;10: 17-24.

15. Wu NQ, Li ZW, Qu T. Energy efficiency optimization in scheduling crude oil operations of refinery based on linear programming // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166. pp. 49-57. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.222.

16. Nguyen TV, Barbosa YM, da Silva JA, et al. A novel methodology for the design and optimisation of oil and gas offshore platforms // *Energy*. 2019, Vol. 185, pp. 158-175. doi: 10.1016/j.energy.2019.06.164.

17. Romanova VV, Khromov SV, Suslov KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.

18. Baykova LR, Garriss NA. Algorithm for the calculation of energy efficiency indicators of maintaining reservoir pressure system equipment. *Petroleum engineering*. 2018; 2(16): 61-66. doi: 10.17122/ngdelo-2018-2-61-66.

19. Fedorov OV, Semenov AS, Egorov AN, et al. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vnedreniya sistemy nepreryvnogo monitoringa pokazatelei kachestva elektroenergii na ob"ektakh gornyykh predpriyatii. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016; 9(10): 91-97.

Authors of the publication

Anna Yu. Arestova - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Vladimir N. Ulyanov - Novosibirsk Research and Development Center, Novosibirsk, Russia.

Mikhail Yu. Frolov - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено

10.10.2021 г.

Отредактировано

13.10.2021 г.

Принято

23.12.2021 г.



СТРУКТУРА ВРЕМЕНИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ИСКАЖЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОГРАММНО- АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕГО СОКРАЩЕНИЯ

Бородин М.В.², Виноградов А.В.¹, Букреев А.В.¹, Панфилов А.А.^{2,3}

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина,
г. Орел, Россия

³Филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», г. Орел, Россия

shkolamolen@gmail.com, panfilov.aa@mrsk-1.ru, energy@orelsaul.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследование структуры времени определения источника искажения качества электроэнергии и способа его сокращения за счёт применения мобильного программно-аппаратного измерительного комплекса. МЕТОДЫ. Выполнен анализ количества обращений по поводу некачественной электроэнергии, структуры и значений времени, затрачиваемого на определение источников искажения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) за нормативные значения с учётом всех его составляющих. РЕЗУЛЬТАТЫ. Определено, что количество обращений, поступающих в электросетевую компанию по поводу некачественной электроэнергии остается достаточно большим. При этом выявление источника искажений, необходимое для разработки мероприятий по устранению искажений занимает продолжительное время. Исходя из проанализированных данных, оно может составлять до 21-го дня. Количество случаев, когда источник искажения ПКЭ не выявлялся более двух дней составило 117 случаев из 419 проанализированных. Предложены решения по сокращению указанного времени. ВЫВОДЫ. Представленные в статье решения позволяют сократить время, затрачиваемое на определение источника искажения ПКЭ за счёт применения мобильного программно-аппаратного измерительного комплекса (ПАИК). Предложен вариант структуры ПАИК, в которую входят датчики и центральный блок ПАИК. Предлагаемый ПАИК может использоваться при отсутствии внешних каналов связи за счёт применения передачи данных от датчиков комплекса на центральный блок с помощью технологий Long Range (LORA), или Wireless Fidelity (Wi-Fi). Кроме этого, ПАИК предусматривает синхронизацию всех датчиков по времени.

Ключевые слова: время; мониторинг; электрические сети; показатели качества электроэнергии; измерения.

Для цитирования: Бородин М.В., Виноградов А.В., Букреев А.В., Панфилов А.А. Структура времени определения источника искажений показателей качества электрической энергии и программно-аппаратный комплекс для его сокращения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 29-41. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-29-41.

TIME STRUCTURE OF THE DISTORTION SOURCE IDENTIFICATION OF THE ELECTRIC POWER QUALITY INDICATORS AND HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR ITS REDUCTION

Borodin MV², Vinogradov AV¹, Bukreev AV¹, Panfilov AA.^{2,3}

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Orel, Russia

³Branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», Orel, Russia

shkolamolen@gmail.com, panfilov.aa@mrsk-1.ru, energy@orelsaul.ru

Abstract: THE PURPOSE. Investigation of the time structure for the distortion source identification of the electric power quality and a method for its reduction using of a mobile software and hardware instrumentation system. METHODS. The analysis of the number of

complaints regarding low-quality electric power, the structure and values of the time spent on the identification of the distortion sources of the electric power quality indicators (PQI) for the standard values, taking into account all its components, was carried out. RESULTS. It is determined that the number of complaints received by the power grid company regarding low-quality electric power remains high. At the same time, it takes a long time to identify the distortion source before putting in place the necessary remedial measures. According to the analyzed data, it can take up to 21 days. The number of cases when the distortion source of the PQI couldn't be detected within two days was 117 cases of 419 analyzed. The solutions to reduce this time are proposed. CONCLUSIONS. The solutions presented in the article make it possible to reduce the time spent on the source distortion identification of the PQI due to the use of a mobile hardware and software instrumentation system (HSIS). A variant of the HSIS structure is proposed, which includes sensors and the HSIS central unit. The proposed HSIS can be used in the absence of external communication channels through the use of data transmitted from the sensors of the system to the central unit using Long Range (LORA) or Wireless Fidelity (Wi-Fi) technologies. In addition, the HSIS provides time synchronization of all the sensors.

Key words: time; monitoring; electric power networks; power quality indicators; measurements.

For citation: Borodin MV, Vinogradov AV, Bukreev AV, Panfilov AA. Time structure of the distortion source identification of the electric power quality indicators and hardware and software system for its reduction. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):29-41. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-29-41.

Введение и литературный обзор

Качество электроэнергии (КЭ) характеризуется рядом показателей, регламентируемых¹ и является одним из параметров качества электроснабжения потребителей. Потребители и электросетевые компании заинтересованы в поддержании КЭ в пределах требований нормативных документов, в частности¹. Однако далеко не всегда удаётся обеспечивать все ПКЭ на необходимом уровне. Эта проблема актуальна как для промышленных, коммунальных городских, так и для сельских электрических сетей [1, 2]. Особенности сельских электрических сетей, такие как завышенная протяжённость линий электропередачи 10 и 0,4 кВ, применение заниженных сечений проводов, значительная распределённость нагрузок по территории [2, 3] приводит к тому, что для них проблема некачественной электроэнергии особенно остра. И, если в городских и промышленных сетях искажаются чаще такие ПКЭ, как коэффициент гармонических составляющих напряжения и несимметрия напряжений [4-6], то в сельских это, в первую очередь, медленные изменения напряжения (отклонение напряжения), коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательности.

Для поддержания КЭ на необходимом уровне как электросетевые организации, так и потребители используют, в обоснованных случаях, различные способы, такие как применение фильтрокомпенсирующих устройств, стабилизаторов напряжения и линейных регуляторов и т.п. [7-9]. Для обоснования применения того, или иного способа и технического средства требуется проведение предварительного обследования сети с целью выявления источника искажений.

В сельских электрических сетях отсутствуют системы мониторинга качества электрической энергии, хотя разрабатываются их отечественные и зарубежные варианты [10]. В них предлагается установка средств контроля отклонений и отключений напряжения на вводах потребителей [11, 12] установка датчиков контроля качества электроэнергии в контрольных точках электрической сети [10, 13]. В связи с отсутствием таких систем, выявление несоответствий ПКЭ осуществляется, в сельских сетях, в основном в ходе анализа обращений потребителей по поводу некачественной электроэнергии. Так, в работах [6, 14] указывается, что количество обращений по поводу несоответствия ПКЭ установленным нормативным требованиям остается на высоком уровне и в среднем в год составляет 659 штук на примере электросетевой организации – филиала публичного акционерного общества «Межрегиональная распределительная сетевая компания Центра-«Орелэнерго» (далее филиал ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго»). При этом в [6, 14]

¹ ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 10.11.2021г)

указано, что чаще всего потребители обращаются по вопросу несоответствия ПКЭ «отклонение напряжения». При обращении потребителей в энергоснабжающую организацию она должна принять меры по устранению несоответствий ПКЭ. Перед тем, как выбрать конкретные мероприятия, направленные на повышение качества электроэнергии, специалистами компании проводится работа по определению уровня искажений ПКЭ, поиску источника искажений. Для этого специалисты электросетевой компании проводят измерение ПКЭ в сети, к которой подключены потребители, жалующиеся на несоответствие ПКЭ. Эта работа требует определённого времени и затрат, связанных с выездом сотрудников электросетевой компании «на место», проведение ими необходимых, и часто достаточно продолжительных измерений ПКЭ, обработку результатов измерений. Сокращение этого времени является актуальной задачей, так как позволяет снизить время несоответствия качества электроэнергии требованиям нормативных документов.

В [11] представлена структура времени несоответствия КЭ требованиям нормативных документов (или договорным обязательствам). Это время, $t_{\text{несоот.КЭ}}$, ч, может быть определено по формуле [11]:

$$t_{\text{несоот.КЭ}} = t_{\text{пол.инф.КЭ}} + t_{\text{расп.инф.КЭ}} + t_{\text{рег.КЭ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{пол.инф.КЭ}}$ - время получения информации о выходе ПКЭ за установленный уровень, ч; $t_{\text{расп.инф.КЭ}}$ - время на распознавание информации о выходе ПКЭ за установленный уровень, ч; $t_{\text{рег.КЭ}}$ - время на регулирование КЭ, ч [11].

Под временем получения информации, $t_{\text{пол.инф.КЭ}}$, ч, подразумевается временной интервал с момента выхода ПКЭ за установленный уровень до момента времени получения информации о нем диспетчерской службой электроснабжающей организации, эксплуатирующей электрическую сеть [11].

Время на распознавание информации $t_{\text{расп.инф.КЭ}}$, ч, предлагается определять следующим образом [11]:

$$t_{\text{расп.инф.КЭ}} = t_{\text{инф.сообщ.КЭ}} + t_{\text{прин.решен.КЭ}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{инф.сообщ.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для чтения (распознавания) полученной информации о выходе ПКЭ за установленный уровень, ч [11]; $t_{\text{прин.решен.КЭ}}$ – интервал времени, затрачиваемый диспетчером на принятие решения, ч [11].

Время на регулирование $t_{\text{рег.КЭ}}$, ч, – это интервал времени, необходимый для проведения регулирования КЭ, который определяется:

$$t_{\text{рег.КЭ}} = t_{\text{нар.КЭ}} + t_{\text{дв.КЭ}} + t_{\text{доп.КЭ}} + t_{\text{вып.рег.КЭ}} + t_{\text{пров.КЭ}} + t_{\text{ок.раб.КЭ}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{нар.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для подготовки ремонтной бригады к выезду, включая время на подготовку наряда, или распоряжения, подготовку оборудования, приспособлений, погрузку на транспорт, ч; $t_{\text{дв.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый на то, чтобы ремонтная бригада добралась до места повреждения, ч [11]; $t_{\text{доп.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для допуска ремонтной бригады к выполнению работ, ч [11]; $t_{\text{вып.рег.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для выполнения непосредственно регулирования КЭ, ч [11]; $t_{\text{пров.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для проверки выполненной регулировки КЭ, ч [11]; $t_{\text{ок.раб.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для окончания работ, сворачивания рабочего места, выхода бригады с рабочего места и для документального оформления окончания работ, ч [11].

Если на этапе проверки КЭ после регулирования не удалось добиться необходимого результата, то регулирование проводится повторно до тех пор, пока КЭ не будет соответствовать требованиям. В этом случае время на регулирование каждый раз будет дополнительно увеличиваться за счет времени для выполнения непосредственно регулирования КЭ и времени проверки этой регулировки [11].

Фактическое суммарное время несоответствия КЭ требованиям нормативных документов (или договорным обязательствам) за год $T_{\text{факт.несоот.КЭ.год}}$, ч, определяется [11]:

$$T_{\text{факт.несоот.КЭ.год}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{КЭ}}} t_{\text{несоот.КЭ.}i}, \quad (4)$$

где $t_{\text{несоот.КЭ.}i}$ – время несоответствия i -го выхода показателя КЭ за рассматриваемый период, ч [11]; $n_{\text{КЭ}}$ – количество выходов ПКЭ за установленный уровень за год [11].

Материалы и методы

В приведённой выше структуре времени несоответствия КЭ не в полной мере учтены составляющие времени на распознавание информации, $t_{\text{расп.инф.КЭ}}$, а также в [11] недостаточно раскрыты факторы, влияющие на него. Кроме этого недостаточно показаны

факторы, влияющие на время получения информации, $t_{\text{пол.инф.КЭ}}$. Не приведены подробные структуры $t_{\text{пол.инф.КЭ}}$ и $t_{\text{расп.инф.КЭ}}$, представляющие ценность для разработки мероприятий по сокращению времени несоответствия КЭ. Очевидно, что $t_{\text{пол.инф.КЭ}}$ зависит от способа выявления факта несоответствия КЭ, то есть от оснащённости электрической сети средствами мониторинга КЭ.

Составляющая времени распознавания информации, $t_{\text{инф.сообщ.КЭ}}$ в [11] представлена не вполне точно. Дело в том, что распознавание информации о несоответствии КЭ должно осуществляться в сети, в которой оно произошло, по результатам проведения измерений.

Эту составляющую правильной было бы определять следующим образом:

$$t_{\text{инф.сообщ.КЭ}} = t_{\text{пр.сообщ.КЭ}} + t_{\text{нар.изм.КЭ}} + t_{\text{дв.изм.КЭ}} + t_{\text{доп.изм.КЭ}} + t_{\text{вып.изм.КЭ}} + t_{\text{обр.изм.КЭ}} + t_{\text{ок.изм.КЭ}} + t_{\text{инф.дисп.КЭ}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{пр.сообщ.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для прочтения информации о несоответствии КЭ, ч; $t_{\text{нар.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для подготовки ремонтной бригады к выезду для проведения измерения КЭ, включая время на подготовку наряда, или распоряжения, подготовку оборудования, приспособлений, погрузку на транспорт и т.п., ч; $t_{\text{дв.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый на то, чтобы бригада добралась до места, где необходимо выполнить измерения КЭ, ч; $t_{\text{доп.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для допуска бригады к выполнению работ по измерению КЭ, ч; $t_{\text{вып.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для выполнения измерений КЭ, ч; $t_{\text{обр.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для обработки результатов измерений КЭ, ч; $t_{\text{ок.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для окончания работ по измерениям КЭ, то есть сворачивания рабочего места, документального оформления окончания работ, ч; $t_{\text{инф.дисп.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для передачи результатов обработки информации по измерениям диспетчеру, ч.

Такая структура времени $t_{\text{инф.сообщ.КЭ}}$ учитывает необходимые действия по определению источника искажения КЭ. На основе анализа составляющих времени $t_{\text{инф.сообщ.КЭ}}$ в структуре времени распознавания информации о несоответствии КЭ должны разрабатываться мероприятия, способы и технические средства сокращения времени несоответствия ПКЭ.

В открытых источниках [1-19] отсутствуют данные о значениях времени, затрачиваемого на определение причины несоответствия КЭ нормативным значениям и его составляющих, а также данные об основных факторах, влияющих на вышеуказанное время.

При определении источника искажения ПКЭ специалисты электросетевой компании используют анализаторы КЭ. Данные устройства позволяют производить мониторинг ПКЭ в конкретной точке сети. При необходимости выполнить измерения в нескольких точках устанавливаются несколько анализаторов качества, или один последовательно устанавливается в разных точках. При этом данные, полученные с помощью анализаторов КЭ не синхронизированы по времени измерения, это время может отличаться в несколько секунд, минут или суток. Этот факт, в свою очередь, приводит к увеличению времени на анализ результатов измерений КЭ и снижает достоверность выявления причин искажения. Время определения источника искажений КЭ также зависит от конфигурации электрической сети, чем она сложнее, тем больше времени требуется на выполнение всех операций по определению источника искажений. Влияют на это время и уровень компетентности работников, выполняющих измерения, обработку полученных данных, расстояние от базы нахождения работников до места, в котором необходимо проводить измерения, другие факторы.

Современные приборы учета, интегрированные в автоматизированную информационно-измерительную систему коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ), позволяют производить измерения ПКЭ при оснащении их счётчиками электроэнергии с соответствующим функционалом [15-19]. Однако каналы передачи информации о качестве электроэнергии в данных системах не предусмотрены, соответствующими счётчиками и системами оснащены в настоящее время далеко не все потребители. Снятие же данных о КЭ со счётчика требует доступа к нему сотрудника электросетевой организации, что, при размещении счётчика на частной территории, требует дополнительного времени на согласование доступа с владельцем данной частной территории. Так же не всегда счётчиками, измеряющими ПКЭ, производятся измерения всех ПКЭ, которые указаны в ГОСТ. Кроме того, основной целью использования АИИСКУЭ в электросетевой компании является получение данных о потреблении электроэнергии потребителями, но не о КЭ.

Актуальным вопросом является разработка способов и устройств, программно-аппаратных комплексов (ПАИК), позволяющих производить синхронизированные по времени измерения ПКЭ в разных точках сети. Среди требований к функциональным возможностям ПАИК можно выделить следующие основные: проведение измерений ПКЭ и других параметров режимов работы электрической сети одновременно в нескольких точках (количество которых определяется отдельно в разных случаях); измерение и архивирование потребляемого тока в точках установки датчиков комплекса; измерение и архивирование потребляемой мощности в точках установки датчиков комплекса; измерение и архивирование потребляемой электроэнергии в точках установки датчиков комплекса; измерение и архивирование значений напряжений трехфазной сети в точках установки датчиков комплекса; фиксация моментов включения и отключения нагрузки на участке сети в точках установки датчиков комплекса; дистанционное получение данных о параметрах режимов работы сети с датчиков комплекса через *Wi-Fi*, или другой канал, соединение; синхронизация по времени измерения между датчиками, входящими в комплекс и привязка всех датчиков к астрономическому времени; возможность переноса полученных данных в электронные таблицы *Microsoft Excel (Exel)* и специальный программный продукт для их обработки.

Так же датчики ПАИК должны быть достаточно универсальными, то есть они должны иметь возможность подключаться к разным сечениям шин, проводов, типам проводов, и не оказывать значительного воздействия на изоляцию и проводник. При этом необходимо обосновать максимальное количество датчиков, которым необходимо комплектовать ПАИК и структуры основных данных, которые необходимо передавать с датчиков комплекса, в свою очередь реализация этой задачи позволит снизить себестоимость устройств, позволяющих производить мониторинг ПКЭ.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, на время распознавания информации об искажении КЭ, $t_{расп.инф.КЭ}$, и его составляющие, в том числе определение источника искажений КЭ, $t_{инф.сообщ.КЭ}$, влияет большое количество факторов.

Основные из них приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные факторы, влияющие на время распознавания информации об искажении КЭ

№	Временные интервалы	Основные факторы влияющие на временной интервал
1	$t_{пол.инф.КЭ}$ – интервал времени, необходимый для получения информации о выходе ПКЭ за установленный уровень, ч	1. Форма получения информации о факте несоответствия КЭ: - заявление потребителя, переданное почтой; - заявление потребителя в личном кабинете на сайте; - звонок потребителя в электросетевую компанию; - заявление потребителя, приехавшего для его подачи в электросетевую компанию; - сообщение от системы мониторинга КЭ.
2	$t_{пр.сообщ.КЭ}$ – интервал времени, необходимый для прочтения информации о несоответствии КЭ, ч;	1. Длина сообщения. 2. Форма сообщения. 3. Время поступления сообщения.
3	$t_{нар.изм.КЭ}$ – интервал времени, необходимый для подготовки ремонтной бригады к выезду для проведения измерения КЭ, включая время на подготовку наряда, или распоряжения, подготовку оборудования, приспособлений, погрузку на транспорт и т.п., ч;	1. Форма передачи сообщения о выезде. 2. Местонахождения членов бригады на момент получения сообщения о выезде. 3. Комплектность необходимых приборов. 4. Комплектность и формы необходимых для заполнения документов. 5. Количество членов бригады.
4	$t_{дв.изм.КЭ}$ – интервал времени, необходимый на то, чтобы бригада добралась до места, где необходимо выполнить измерения КЭ, ч;	1. Тип транспорта. 2. Расстояние до места. 3. Состояние дороги. 4. Погодные условия. 5. Компетентность и состояние водителя. 6. Количество точек измерения. 7. Расстояние между точками измерения.

5	$t_{\text{доп.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для допуска бригады к выполнению работ по измерению КЭ, ч;	1. Форма и порядок допуска. 2. Скорость выполнения действий по допуску (компетентность допускающих). 3. Количество точек измерения, в которых необходимо осуществить допуск. 4. Количество членов бригады.
6	$t_{\text{вып.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для выполнения измерений КЭ, ч;	1. Требования к продолжительности измерений. 2. Количество точек измерения. 3. Компетентность членов бригады. 4. Количество членов бригады. 5. Расстояние между точками измерения. 6. Технология сбора измеренных данных. 7. Порядок выполнения измерений. 8. Конструкция и состояние электрооборудования электрической сети, в которой проводятся измерения. 9. Количество необходимых повторов измерений. 10. Комплектность приборами. 11. Тип приборов.
7	$t_{\text{обр.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для обработки результатов измерений КЭ, ч;	1. Технология сбора данных. 2. Технология обработки данных. 3. Форма представления результатов обработки данных. 4. Количество повторов измерений для получения необходимых результатов. 5. Компетентность сотрудников, осуществляющих обработку. 6. Количество точек измерения. 7. Объём обрабатываемых данных.
8	$t_{\text{ок.изм.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для окончания работ по измерениям КЭ, то есть сворачивания рабочего места, документального оформления окончания работ, ч;	1. Форма и порядок окончания работ. 2. Скорость выполнения действий по окончанию работ (компетентность допускающих). 3. Количество точек измерения, в которых необходимо окончить работы. 4. Количество членов бригады.
9	$t_{\text{инф.дисп.КЭ}}$ – интервал времени, необходимый для передачи результатов обработки информации по измерениям диспетчеру, ч.	1. Форма передачи информации. 2. Применяемые средства передачи информации.

В настоящее время отсутствуют практические исследования, направленные на определение статистических данных по значениям всех приведённых выше составляющих времени в зависимости от влияющих факторов. Это не позволяет в полной мере моделировать время определения источников искажения ПКЭ.

Проведен ряд исследований [6,14], направленных на анализ количества обращений о нарушениях КЭ, в которых рассмотрено количество обращений в разные годы и их причины. Однако в этих публикациях не рассмотрен вопрос затрат времени выявления и устранения источников искажения ПКЭ. В настоящем исследовании определено количество обращений потребителей по поводу несоответствия ПКЭ нормативным значениям за девять месяцев 2021-го года в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» и значений времени, затраченного на определение источников искажения ПКЭ в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Полученные результаты представлены на рисунке 1 и таблице 2.

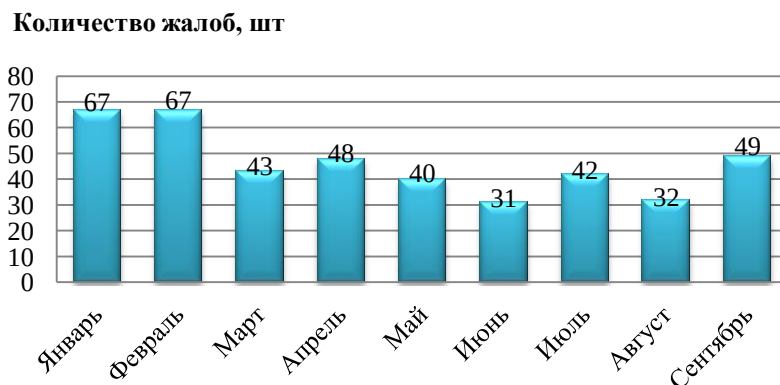


Рис. 1 Количество обращений потребителей в филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» за девять месяцев 2021 года в по поводу искажения ПКЭ

Fig. 1 The number of consumer appeals to the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenenergo for nine months of 2021 regarding the distortion of the PCE

Полученные данные показывают, что чаще всего потребители обращались с заявлениями по поводу некачественной электроэнергии в зимний период времени. Это обусловлено, прежде всего, увеличением потребления электроэнергии потребителями и, соответственно, повышенной нагрузкой сетей, которая приводит к повышению потерь напряжения в ней. Увеличение количества обращений потребителей в июле по отношению к маю и к июню обусловлено отпуском сезоном, который проводится на дачах, в сельских домах. В это время активно производится ремонт и строительство домов. Электропотребление растёт за счёт применения электроинструментов в процессе строительства, ремонта, применения средств для полива растений на огородах. За анализируемый период количество обращений составило 419 шт. Стоит отметить, что количество обращений остается на высоком уровне и электросетевой организации необходимо проводить работу по его сокращению. Для этого необходимо применять проверенные временем способы и новые решения, позволяющие уменьшить количество искажений ПКЭ.

Анализ времени, затраченного на определение источника искажений ПКЭ, производился на основании данных, полученных из System Analysis and Program Development (SAP) филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Значения исследуемого времени представлены в таблице 2. Значения для удобства анализа разбиты на интервалы, равные суткам (24 ч).

Таблица 2

Время, затраченное на определение источника искажений ПКЭ

Интервал времени устранения искажения ПКЭ, ч	Количество заявлений, шт.								
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
0-24	13	20	4	4	2	6	5	5	3
25-48	40	35	22	30	20	14	27	18	33
49-72	3	5	10	7	1	5	2	4	4
73-96	2	3	2	3	2	2	3	2	2
97-120	2	1	1	1	2	2	1	3	1
121-144	3	2	1	0	2	1	1	0	3
145-168	0	0	1	2	11	0	0	0	0
169-192	0	0	1	0	0	0	2	0	0
193-216	1	1	0	1	0	0	0	0	0
217-240	2	0	0	0	0	0	0	0	2
более 241	1	0	1	0	0	1	1	0	1

По результатам анализа представленных в таблице 1 данных можно сделать вывод, что чаще всего источник искажений ПКЭ определялся в течении одних или двух суток.

Непосредственно измерения производились в течение суток в этих случаях. При этом чаще всего источником искажения была несимметрия в сети, или нарушения в работе внутренних сетей отдельных потребителей. Большая часть жалоб была устранена выполнением мероприятий по симметрированию нагрузок.

Самое продолжительное время определения источника искажения ПКЭ составляет 21 сутки, а количество случаев, когда причина выхода ПКЭ за регламентированные нормы не выявлялась более двух дней составило 117. Это значительное время, которое необходимо сокращать.

Одним из способов сокращения времени определения источника искажений ПКЭ является, как отмечалось выше, применение ПАИК, позволяющих проводить синхронизированные измерения. Примером такого комплекса может быть комплекс на базе устройств ТЭМП-3-W[20]. ПАИК имеет следующую структуру. В него входят центральный блок ЦБ ТЭМП-3-W и датчики ТЭМП-3-W1 - ТЭМП-3-Wn. ЦБ комплекса собирает данные от датчиков по Wi-Fi – каналу, или с помощью технологии LORA и обрабатывает их. Все датчики синхронизированы по времени измерений и привязаны к астрономическому времени.

На рисунке 2 показана структурная схема применения ПАИК на базе ТЭМП-3-W для определения источника искажения ПКЭ в сельской электрической сети. На рисунке: ВКА1 - коммутационный аппарат отходящей линии, установленный на трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ; ТЭМП-3-W1 - ТЭМП-3-W5 – датчики ПАИК; ЦБ ТЭМП-3-W – центральный блок ПАИК; ВКА2 – вводной коммутационный аппарат потребителя.

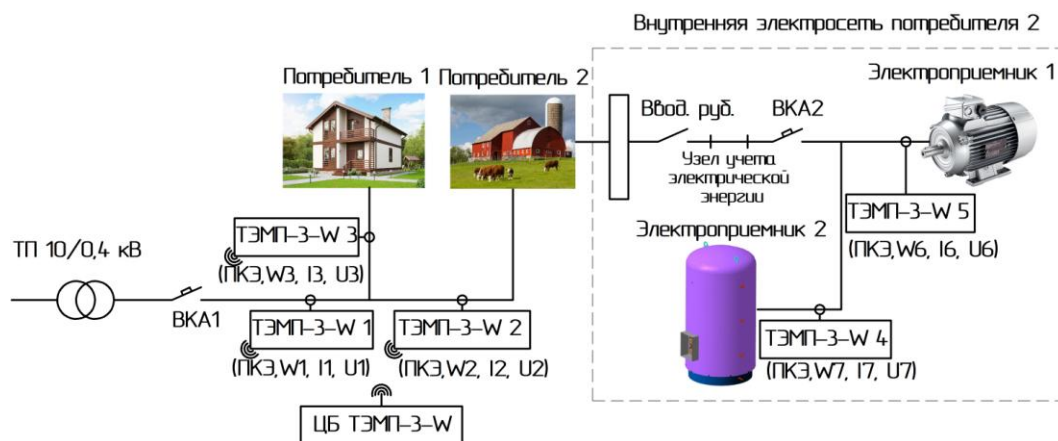


Рис. 2 Структурная схема применения ПАИК на базе ТЭМП-3-W для определения источника искажения ПКЭ в сельской электрической сети

Fig. 2 Block diagram of the use of PAIC based on TEM-3-W to determine the source of PCE distortion in the rural electrical network

При определении источника искажения ПКЭ датчики ПАИК устанавливаются в разных точках сети. Место установки выбирается на основании того, искажение какого ПКЭ указано в обращении потребителя, конфигурации сети, в том числе количества отходящих линий от ТП, местоположения потребителя, обратившегося по поводу КЭ. Учитывается возможность проведения измерений в электрической сети потребителя, количество потребителей в сети. Установка датчиков ПАИК в разных точках сети и возможность синхронизации их по времени позволяет, в большинстве случаев, локализовать источник искажения ПКЭ, так как анализ результатов измерения в нескольких точках сети даёт возможность сравнивать их между собой, определять уровень искажения ПКЭ в каждой точке одновременно, делать соответствующие выводы, указывающие на источник искажения. Измерения ПКЭ, а также потребления электроэнергии (W), тока (I) и напряжения (U) в точках установки датчиков ТЭМП-3-W1 - ТЭМП-3-W5 позволяет анализировать не только значения в них ПКЭ, но и определять потери напряжения, потери электроэнергии и мощности на участках сети, составлять баланс мощности и токов. Это даёт дополнительную возможность выявлять источники искажений ПКЭ вплоть до отдельного электроприёмника.

ПАИК также позволяет получать графики нагрузки по участкам сети, пиковые, среднеквадратичные значения токов и напряжений, мощностей по участкам, выявлять отклонения и потери напряжения по участкам. Это даёт возможность выявить участки с недостаточной пропускной способностью, отклонениями показателей качества

электроэнергии от нормированных значений, выявить оборудование, вносящее несимметрию в сеть, определить другие источники искажений.

На рисунке 3 показан внешний вид устройства ТЭМП-3-W с одним датчиком.

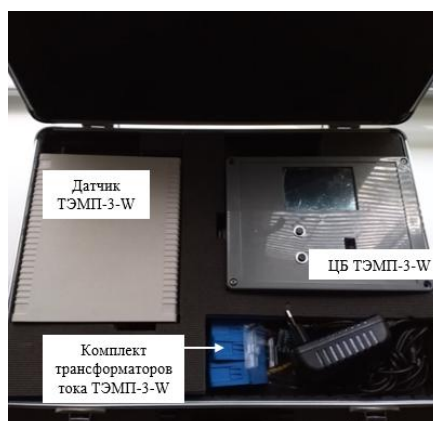


Рис. 3 Внешний вид устройства ТЭМП-3-W

Fig. 3 Appearance of the TEMP-3-W device

Датчики и ЦБ ТЭМП-3-W оснащены также внешними съёмными накопителями, что позволяет архивировать на них результаты измерений. Это даёт возможность не терять данные при перебоях связи и при необходимости обрабатывать их ретроспективно.

Применение ПАИК позволяет сократить время на определение источника искажений в первую очередь за счёт того, что сбор данных от датчиков осуществляется дистанционно, их обработка может производиться фактически одновременно по всем точкам измерения. При этом не требуется снятие датчиков с точек измерения. Поэтому при необходимости повторных измерений не требуется вновь устанавливать датчики. Кроме того, если при обследовании используется один прибор, устанавливаемый в разные точки сети, это требует каждый раз его установки, снятия и соответствующих процедур допуска, окончания работ. Применение же ПАИК с несколькими датчиками позволяет один раз произвести их установки и один раз снятие, что также позволяет экономить время на определение источника искажений ПКЭ.

На основании результатов определения источника разрабатываются мероприятия по устранению искажений ПКЭ. Одним из таких мероприятий повышения качества электроэнергии в электрических сетях является выбор рациональной уставки переключателя без возбуждения (ПВВ) на ТП 10/0,4 кВ. Применение ПАИК позволяет выполнить это мероприятие. Методика применения комплекса в этом случае следующая:

В центральный блок ЦБ ТЭМП-3-W поступают данные с датчиков ТЭМП-3-W о напряжении в контрольных точках сети. Замеры производятся, согласно ГОСТ в течение суток или в течение семи суток (что предпочтительнее). Результаты замеров анализируются, в результате чего определяется средневзвешенное, с учётом времени, значение коэффициента регулирования.

Далее рассчитываются интервалы времени $tn\%$, %, то есть доли времени в процентах от времени проведения измерения, в течение которых наблюдалось одинаковое соответствующее значение коэффициента регулирования:

$$tn\% = \frac{tn}{\sum_{i=1}^n ti} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где tn – интервалы времени, в часах, в течение которых наблюдалось одинаковое соответствующее значение коэффициента регулирования. Данные коэффициенты могут иметь как положительное, так и отрицательное значения, ч;

$\sum_{i=1}^n ti$ – общее время измерений, ч.

Вычисляются коэффициенты регулирования $K_{pertn\%+}$, $K_{pertn\%-}$, %, полученные и зафиксированные в течение соответствующих интервалов времени по выражениям:

$$K_{\text{pertn}\%+} = K_{\Pi} \cdot \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_d}{100} + 1 \right)} - 1 \right) \cdot 100 \right), \quad (7)$$

$$K_{\text{pertn}\%-} = K_{\Pi} \cdot \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_d}{100} + 1 \right)} + 1 \right) \cdot 100 \right), \quad (8)$$

где $K_{\text{pertn}\%+}$ – коэффициент, указывающий величину, необходимую для изменения уровня отклонения установившегося напряжения на трансформаторной подстанции при его положительном отклонении от нормативного значения, %;

$K_{\text{pertn}\%-}$ – коэффициент, указывающий величину, необходимую для изменения уровня отклонения установившегося напряжения на трансформаторной подстанции при его отрицательном отклонении от нормативного значения, %;

K_{Π} – коэффициент пропорциональности в зависимости от типа используемого управляющего устройства, безразм.;

ΔU_d – уровень отклонения установившегося значения напряжения на границе разграничения баланса между потребителем и энергоснабжающей организацией, %;

A_n – точка склонения баланса потребителя и энергоснабжающей организации, шт.

Определяется, с учётом времени, значение коэффициента регулирования $K_{\text{ср.взв}}$, %, с помощью выражения:

$$K_{\text{ср.взв}} = \frac{K_{\text{pert1}\%} \cdot t1\% + K_{\text{pert2}\%} \cdot t2\% + \dots + K_{\text{pertn}\%} \cdot tn\%}{t1\% + t2\% + \dots + tn\%}, \quad (9)$$

где $K_{\text{pert1}\%}$, $K_{\text{pertn}\%}$ – коэффициенты регулирования, полученные и зафиксированные в течение соответствующих интервалов времени $t1 \dots tn$, %;

$t1\% \dots tn\%$ – интервалы времени, то есть доли времени в процентах от времени проведения измерения, в течение которых наблюдалось одинаковое соответствующее значение коэффициента регулирования, %.

Предположим, в процессе измерений (время измерений 24 часа) и обработки полученных данных зафиксированы следующие результаты по рекомендуемым коэффициентам регулирования и соответствующим интервалам времени: $t1 = 15\text{ч}$, $K_{\text{pert1}\%} = +2\%$; $t2 = 5\text{ч}$, $K_{\text{pert2}\%} = +3\%$; $t3 = 4\text{ч}$, $K_{\text{pert3}\%} = 0\%$. Тогда $t1\% = (15/24) \cdot 100 = 62,5\%$, $t2\% = 20,8\%$, $t3\% = 16,7\%$. В этом случае средневзвешенный коэффициент регулирования составит:

$$K_{\text{ср.взв}} = \frac{+2\% \cdot 62,5\% + (+3\%) \cdot 20,8\% + 0\% \cdot 16,7\%}{100\%} = +1,87$$

Таким образом делается вывод о том, что неавтоматический регулятор напряжения (ПБВ) на ТП должен находиться в положении, ближайшем у +1,87 (вероятно, необходимо установить в положение +2% при ступенях ПБВ +0,5, +1, +1,5, +2, +2,5%) для обеспечения наиболее рационального уровня напряжения на вводах всех потребителей.

Выявление других искажений ПКЭ с помощью ПАИК позволяет разрабатывать соответствующие мероприятия по повышению КЭ.

Выводы

Разработка мероприятий по устранению искажений качества электроэнергии в электрических сетях требует предварительного обследования данных сетей с целью определения источника искажений. Это обследование может занимать значительное время, как показало исследование на примере филиала ПАО «Россети»-«Орёлэнерго» - до 21 суток, хотя в большинстве случаев источник определяется в течение двух суток. Количество случаев, когда источник искажений ПКЭ не выявлялся более двух суток составило 117 случаев из 419 проанализированных.

Сократить время на выявление источника искажений позволяет применение мобильного программно-аппаратного измерительного комплекса, позволяющего производить синхронизированные по времени измерения в нескольких точках обследуемой электрической сети. ПАИК позволяет получать графики нагрузки по участкам сети, пиковые, среднеквадратичные значения токов и напряжений, мощностей по участкам,

выявлять отклонения и потери напряжения по участкам. Это даёт возможность выявить участки с недостаточной пропускной способностью, отклонениями показателей качества электроэнергии от нормированных значений, выявить оборудование, вносящее несимметрию в сеть, определить другие источники искажений. ПАИК может использоваться в том числе при отсутствии внешних каналов связи за счёт применения передачи данных от датчиков комплекса на центральный сервер сбора данных с помощью технологий *LORA*, или *Wi-Fi*.

Применение ПАИК позволяет сократить время на определение источника искажений в том числе за счёт дистанционного сбора данных от датчиков, возможности обработки данных со всех датчиков фактически одновременно с их получением.

Литература

1. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85-92.
2. Амерханов Р.А., Савенко А.В. Мониторинг показателей качества электрической энергии для сельскохозяйственных объектов // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 5 (115). С. 32-36.
3. Беликов Р.П. Организационно-технические и технические мероприятия повышения качества электроэнергии // В сборнике: Физика и современные технологии в АПК. Материалы X Международной молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников. 2019. С. 38-41.
4. Лошкарев В.И., Шкрыль А.М., Машанов Е.В. Качество электрической энергии в Чебоксарских городских электрических сетях // В сборнике: Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения. Сборник научных трудов. А.Ю. Александров (гл. редактор). Чебоксары, 2015. С. 178-185.
5. Грачева Е.И., Наумов О.В., Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 71-77.
6. Borodin M., Psarev A., Kudinova T., Mukhametzhaynov R. Improving power quality by calculating voltage losses // In the collection: E3S Web of Conferences. 2019. С. 1041.
7. Нелюбов В.М., Жилиев Н.Ю. Повышение качества электроэнергии с помощью фильтросимметрирующих устройств // В сборнике: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). 2020. С. 2793-2796.
8. Горелов Ю.И., Кузнецова А.Д., Лыпырева П.С., Шашаева В.А. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях с резкопеременными нелинейными нагрузками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 209-214.
9. Komada P., Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Shchur T. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality // Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Т. 95. № 5. С. 79-82.
10. Aleksandar Stanimirović, Miloš Bogdanović, Milena Frtunić, Milena Frtunić. Low-voltage electricity network monitoring system: Design and production experience. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020. V. 16(1).
11. Большев В.Е., Виноградов А.В. Разработка технических средств мониторинга отключений и отклонения напряжения на вводах сельских потребителей : монография // Саратов: Вузовское образование, 2021. 205 с.
12. Vadim Bolshev, Alexander Vinogradov, Michał Jasiński, Tomasz Sikorski, Zbigniew Leonowicz, and Radomir Gono. Monitoring the Number and Duration of Power Outages and Voltage Deviations at Both Sides of Switching Devices. In Journal IEEE Access. August, 2020.
13. Зеленкова Л.И. Сквозной мониторинг качества электроэнергии // Электрика. 2009. № 4. С. 30-33.
14. Бородин М.В., Беликов Р.П., Махиянова Н.В. Повышение качества электроэнергии посредством расчета потерь напряжения // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 3 (47). С. 35-40.
15. Корнилов Г.П., Боков А.И., Романов Д.В., Мигранов М.Ф., и др. Мониторинг качества электроэнергии Вестник // Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 4 (12). С. 44-48.
16. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A., et al. Analysis of the Power Supply Restoration Time after Failures in Power Transmission Lines // Energies 2020, 13, 2736.

17. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Большев В.Е. Устройства и система мониторинга надежности электроснабжения и отклонения напряжения в электрических сетях 0,38 КВ // Вестник НГИЭИ. 2017. № 11 (78). С. 69-81.

18. Кобозев В.А., Лыгин И.В. Мониторинг качества электроэнергии на базе многофункциональных счетчиков // Сельский механизатор. 2017. № 1. С. 44-45.

19. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study // Energies. 2021. Т. 14. № 7.17.

20. Виноградов А.В., Букреев А.В., Виноградова А.В. Таймер – электросчётчик мобильный портативный трёхфазный с радиоканалом передачи данных. Патент № 2739717 Российская Федерация, МПК G01R 11/42, G01R 11/46. // Заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. – Заявка 2020124569, заявлено 23.07.2020; опублик. 28.12.2020, Бюл. № 1.

Авторы публикации

Бородин Максим Владимирович – канд. тех. наук, доцент, заведующий кафедры «Электроснабжение», Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина.

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения, Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ»

Букреев Алексей Валерьевич – младший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ»

Панфилов Александр Александрович – начальник отдела эксплуатации АСДУ службы эксплуатации СДТУиИТ Филиала ПАО «Россети Центр» - «Орёлэнерго», аспирант Орловского государственного аграрного университета имени Н.В. Парахина.

References

1. Naumov AA. Obespechenie trebuемого kachestva elektricheskoy energii. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(1):85-92.

2. Amerhanov RA, Savenko AV. Monitoring pokazatelej kachestva elektricheskoy energii dlya sel'skohozyajstvennykh obektov. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2018;5(115):32-36.

3. Belikov R.P. *Organizacionno-tekhnicheskie i tekhnicheskie meropriyatiya povysheniya kachestva elektroenergii*. V sbornike: Fizika i sovremennye tekhnologii v APK. Materialy H Mezhdunarodnoj molodezhnoj konferencii molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov. 2019. pp. 38-41.

4. Loshkarev VI, SHkryl' AM, Mashanov EV. *Kachestvo elektricheskoy energii v SHeboksarskih gorodskih elektricheskikh setyah*. V sbornike: Regional'naya energetika i elektrotehnika: problemy i resheniya. sbornik nauchnykh trudov. A.YU. Aleksandrov (gl. redaktor). SHeboksary, 2015. pp. 178-185.

5. Gracheva EI, Naumov OV, Fedotov EA. Vliyanie nagruzochnoj sposobnosti silovykh transformatorov na ih ekspluatatsionnye harakteristiki. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2017;19(7-8):71-77.

6. Borodin M, Psarev A, Kudinova T, Mukhametzhanov R. *Improving power quality by calculating voltage losses*. In the collection: E3S Web of Conferences. 2019. pp. 1041.

7. Nelyubov VM, ZHilyaev NYU. *Povyshenie kachestva elektroenergii s pomoshch'yu fil'trosimmetriruyushchih ustrojstv*. V sbornike: Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovaniya, nauki i kul'tury. Materialy Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem). 2020. pp. 2793-2796.

8. Gorelov YUI, Kuznecova AD., Lypyreva PS, et al. Povyshenie kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyah s rezkoperemennymi nelinejnymi nagruzkami. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018;12:209-214.

9. Komada P, Trunova I, Miroshnyk O, et al. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019;95(5):79-82.

10. Aleksandar Stanimirović, Miloš Bogdanović, Milena Frtunić, Milena Frtunić. Low-voltage electricity network monitoring system: Design and production experience. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2020;16(1). doi: 10.1177/1550147720903629.

11. Bol'shev VE, Vinogradov AV. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv monitoringa otklyuchenij i otkloneniya napryazheniya na vvodah sel'skih potrebitelej* : monografiya. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie, 2021. 205 pp.
12. Vadim Bolshev, Alexander Vinogradov, Michał Jasiński, et al. Monitoring the Number and Duration of Power Outages and Voltage Deviations at Both Sides of Switching Devices. *In Journal IEEE Access*. August, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3011836.
13. Zelenkova LI. Skvoznoj monitoring kachestva elektroenergii. *Elektrika*. 2009;4:30-33.
14. Borodin MV, Belikov RP, Mahiyanova NV. Povyshenie kachestva elektroenergii posredstvom rascheta poter' napryazheniya. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2019;3(47):35-40.
15. Kornilov GP, Bokov AI, Romanov DV, et al. Monitoring kachestva elektroenergii *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2005;4(12):44-48.
16. Vinogradov A, Bolshev V, Vinogradova A, et al. Analysis of the Power Supply Restoration Time after Failures in Power Transmission Lines. *Energies*. 2020;13:2736.
17. Vinogradov AV, Vinogradova AV, Bol'shev VE. Ustrojstva i sistema monitoringa nadezhnosti elektrosnabzheniya i otkloneniya napryazheniya v elektricheskikh setyah 0,38 KV. *Vestnik NGIEI*. 2017;11 (78):69-81.
18. Kobozev VA, Lygin IV. Monitoring kachestva elektroenergii na baze mnogofunkcional'nyh schetchikov. *Sel'skij mekhanizator*. 2017;1:44-45.
19. Popescu M, Bitoleanu A, Linca M, Suru CV. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. *Energies*. 2021;14:7.17.
20. Vinogradov AV, Bukreev AV, Vinogradova AV. Patent № 2739717 Rossijskaya Federaciya, MPK G01R 11/42, G01R 11/46. *Tajmer – elektroschyotchik mobil'nyj portativnyj tryohfaznyj s radiokanalom peredachi dannyh*. Zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU FNAC VIM. – Zayavka 2020124569, zayavleno 23.07.2020; opubl. 28.12.2020, Byul. № 1

Authors of the publication

Maxim V. Borodin – Orel State Agrarian University namend after N.V. Parakhina

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Alexey V. Bukreev – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Alexander A. Panfilov – the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenenergo.

Получено 24.11.2021 г.

Отредактировано 29.11.2021 г.

Принято 06.12.2021 г.



МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПАССИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРАХ

Боярская Н.П.², Довгун В.П.¹, Егоров Д.Э.¹, Новиков В.В.¹, Шандрыгин Д.А.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Широкополосные силовые фильтры (ШПФ) являются эффективным средством ослабления гармонических искажений и компенсации резонансных режимов в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются многоимпульсные полупроводниковые преобразователи и дуговые печи. Недостаток простейших широкополосных фильтров, используемых на практике – большая мощность, потребляемая демпфирующим резистором. Особенно сильно это проявляется в устройствах, предназначенных для ослабления гармоник низкого порядка. МЕТОДЫ. Рассмотрена базовая структура ШПФ в форме односторонне нагруженного четырехполюсника лестничной структуры. Определены требования к структуре фильтров, при которых обеспечиваются малые потери мощности в элементах. Предложен метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка, основанный на использовании методов многокритериальной оптимизации. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье предложены новые конфигурации широкополосных фильтров лестничной структуры, обеспечивающих требуемую селективность частотных характеристик и потребляющих значительно меньшую активную мощность, чем традиционные схемы, используемые для подавления низкочастотных гармоник. Показано, что известные варианты ШПФ можно рассматривать как частные случаи предложенной структуры. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенные фильтры лестничной структуры целесообразно использовать в промышленных системах электроснабжения, значительную часть нагрузки которых составляют мощные электроприемники с нелинейными характеристиками. Это позволит нормализовать качество электроэнергии и одновременно повысить энергоэффективность компенсирующих устройств.

Ключевые слова: широкополосные пассивные фильтры; характеристические и нехарактеристические гармоники; потери мощности в пассивных фильтрах.

Для цитирования: Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Шандрыгин Д.А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

MINIMIZATION OF POWER LOSSES IN PASSIVE POWER FILTERS

Boyarskaya NP², Dovgun VP¹, Egorov DE¹, Novikov VV¹, Shandrigin DA¹

¹Siberian Federal University Krasnoyarsk Russia

²Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Broadband passive filters (BBF) are an effective measure to mitigate harmonic resonance in power systems with nonlinear harmonic producing loads. The disadvantage of simple second-order broadband filters are pure selectivity and excessive fundamental frequency losses. This is especially evident in devices designed for low-order harmonics mitigation. This paper presents new broadband filter configurations with superior performances and low fundamental frequency losses. METHODS. A general method of broadband passive filter design is considered. The filter has the form of single-loaded ladder LC-two-port. Conditions of minimal fundamental frequency loss of the filter are determined. RESULTS. This paper presents new broadband filter configurations with superior damping performances and low fundamental frequency losses. Different broadband filter configurations are compared. The results show that 3-5 order broadband ladder filters have better filtering performance and lower power

loss than traditional C-type filters. **CONCLUSION.** The proposed broadband filters can be used for industrial power systems with powerful nonlinear loads. This will normalize the power quality and at the same time improve the energy efficiency of compensating devices.

Key words: broadband passive filters; characteristic and no characteristic harmonics; fundamental frequency power loss.

For citation: Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Shandrigin DA. Minimization of power losses in passive power filters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

Введение

Одной из основных причин низкого качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий является широкое использование мощных нелинейных и несимметричных нагрузок [1 - 3], значительную часть которых составляют многофазные (многопульсные) полупроводниковые преобразователи, а также дуговые печи, используемые для плавки стали и производства ферросплавов. Несинусоидальные токи, создаваемые нелинейными нагрузками, вызывают искажения напряжения в узлах сети. Под действием несинусоидального напряжения происходит интенсивное старение изоляции электроустановок, увеличиваются потери мощности, возникают перенапряжения в узлах сети.

В идеальных условиях спектр тока на входе полупроводникового преобразователя содержит только характеристические гармоники, порядковые номера которых определяются выражением [4 – 6].

$$n = kp \pm 1, \quad (1)$$

где p – пульсность преобразователя; $k = 1, 2, \dots$

Согласно формуле (1) при увеличении пульсности преобразователя из спектра тока исключаются мощные низкочастотные гармоники. Однако в реальных условиях входные токи полупроводниковых преобразователей содержат и нехарактеристические гармоники, а также интергармоники, частоты которых не кратны основной частоте. Нехарактеристические гармоники многопульсных преобразователей имеют широкий спектр, включающий низкочастотный диапазон. Причиной их возникновения может быть несимметрия напряжений трехфазной цепи, разброс характеристик ветвей преобразователя, неодинаковые параметры трехфазных мостовых выпрямителей, образующих многопульсную схему [1, 6, 7].

Распространенным средством компенсации искажений в сетях высокого напряжения являются пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Как правило, типовая схема ПФГ включает узкополосные звенья, осуществляющие подавления мощных характеристических гармоник, а также широкополосное звено второго порядка для ослабления высокочастотных составляющих в спектре искаженного тока. Частотная характеристика такой системы имеет резонансные максимумы, чередующиеся с частотами настройки звеньев. Это может вызвать усиление нехарактеристических составляющих в спектре искаженного тока, создаваемого преобразователем. Необходимо учитывать также, что спектральный состав искаженных токов и напряжений может изменяться при изменении режима работы нелинейной нагрузки или подключении новых нагрузок.

Таким образом, с помощью ПФГ на основе узкополосных звеньев невозможно обеспечить ослабление широкого спектра гармоник, создаваемых полупроводниковыми преобразователями. Для этого необходимы широкополосные фильтры (ШПФ), обеспечивающие демпфирование резонансных максимумов системы электроснабжения в диапазоне, включающем частоты как характеристических, так и нехарактеристических гармоник.

Широкополосные фильтры гармоник второго порядка рассмотрены в [3, 5, 8, 9]. Недостатки таких фильтров – невысокая избирательность и значительные потери мощности в демпфирующем резисторе. Потери увеличиваются при снижении частоты настройки. По этой причине широкополосные фильтры второго порядка обычно используются для ослабления гармоник высокочастотного диапазона.

Основным средством ослабления низкочастотных гармоник являются узкополосные фильтры и фильтры С-типа [10-14]. Однако расчеты показывают, что и в этом случае значительная часть активной мощности, потребляемой ПФГ, приходится на низкочастотные звенья. При этом преобладают потери в реакторах. Таким образом, необходимы новые

структуры компенсирующих устройств, осуществляющих эффективное подавление низкочастотных гармоник, демпфирование резонансных максимумов и одновременно позволяющих уменьшить потери мощности в элементах фильтра.

В статье рассмотрены новые конфигурации широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих требуемую селективность частотных характеристик в заданном диапазоне и потребляющих значительно меньшую активную мощность, чем известные структуры ШПФ.

Литературный обзор

Простейший широкополосный фильтр второго порядка показан на рис. 1. Демпфирующий резистор, включенный параллельно реактору, обеспечивает ослабление гармоник, частоты которых превышают частоту настройки ω_H , на которой сопротивление фильтра минимально.

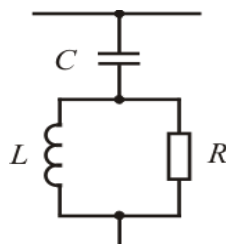


Рис. 1. Широкополосный фильтр второго порядка Fig. 1. Second-order broadband filter configuration

Характеристики и процедура расчета ШПФ второго порядка подробно рассмотрены в работах [8, 9]. На частоте настройки сопротивления реактивных элементов фильтра $X_L(\omega_H) = X_C(\omega_H)$. Модуль частотной характеристики сопротивления широкополосного фильтра имеет минимум на частоте настройки ω_H (рис. 2).

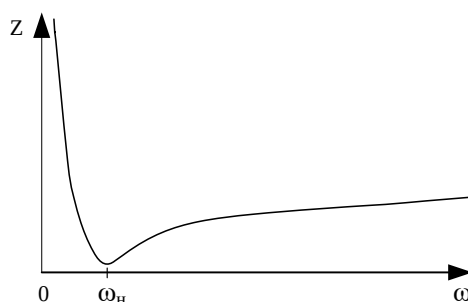


Рис. 2. Частотная характеристика широкополосного фильтра второго порядка Fig. 2. Frequency response of the second-order broadband filter

Форму частотной характеристики фильтра в полосе ослабления, при $\omega > \omega_H$ определяет параметр

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}}.$$

Значение этого параметра варьируется от 0,5 до 2 [8]. Большим значениям Q соответствует увеличение селективности фильтра и снижение потерь в демпфирующем резисторе.

Ток k -й гармоники в реакторе

$$I_L(k) = I(k) \frac{R}{R + j\omega L} = I(k) \frac{Q}{\sqrt{Q^2 + (k/n)^2}}.$$

Здесь n – порядковый номер гармоники, соответствующей частоте настройки.

Ток в демпфирующем резисторе

$$|I_R| = \frac{I_L}{Qn}.$$

Согласно [8] потери мощности в резисторе определяются выражением

$$|I_R|^2 R = \frac{I_L^2}{Qn} X_L.$$

В соответствии с последним выражением мощность, потребляемая демпфирующим резистором на частоте основной гармоники, максимальна, если фильтр настроен на подавление низкочастотных гармоник. Поэтому на практике ШПФ второго порядка используют, как правило, для ослабления высокочастотных гармоник ($n \geq 7$). По этой причине многие авторы называют схему на рисунке 2 фильтром верхних частот [5, 7, 8].

Фильтр С-типа (рис. 3) многие авторы рассматривают как модификацию ШПФ второго порядка. Реактор L и дополнительный конденсатор C_2 образуют последовательный контур, настроенный в резонанс на частоту основной гармоники и шунтирующий демпфирующий резистор на этой частоте. ШПФ второго порядка и фильтры С-типа имеют примерно одинаковые компенсационные характеристики в полосе ослабления. Основное преимущество С-фильтров перед ШПФ 2 порядка – минимальные потери в демпфирующем резисторе на основной частоте.

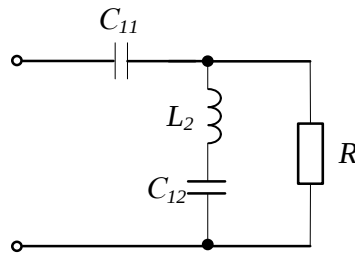


Рис. 3. Фильтр С-типа

Fig. 3. C-type filter

Спектр функций, которые выполняют фильтры С-типа, достаточно широк. Они используются для компенсации реактивной мощности, коррекции частотных характеристик систем электроснабжения, демпфирования переходных процессов, вызванных коммутациями в сети [10 – 16]. Методы расчета фильтров С-типа, предложенные в [10, 11, 13, 15, 16], позволяют получить на их основе многофункциональные устройства, обеспечивающие ослабление характеристических и нехарактеристических гармоник, а также демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения.

В [13, 15] показано, что сопротивление фильтра С-типа имеет индуктивный характер в полосе ослабления, если для емкостей конденсаторов C_1 и C_2 выполняется неравенство

$$C_2 \geq C_1 \frac{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2}.$$

Индуктивность реактора рассчитывается по формуле

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 C_2}.$$

Сопротивление резистора определяется из условия

$$X(\omega_1) = 0.$$

Недостаток фильтров С-типа – высокая чувствительность характеристик к вариациям параметров компонентов, вызванных производственными допусками, старением, колебаниями температуры. При отклонениях параметров элементов от номинальных значений потери в демпфирующем резисторе значительно возрастают. Другой недостаток заключается в том, что реактор фильтра, рассчитанного на ослабление низкочастотных гармоник ($n=2,3$) имеет большую индуктивность и, соответственно, большое активное сопротивление. Поэтому в узкополосных схемах и фильтрах С-типа, работающих в диапазоне гармоник низкого порядка, основную часть активной мощности потребляют реакторы.

Для иллюстрации сказанного приведем результаты расчета потерь в реакторах пассивного фильтра, предназначенного для ослабления искажений напряжения на токоприемнике локомотива в тяговой сети 27,5 кВ. Фильтр включает два узкополосных

звена, настроенных на частоты 145 и 240 Гц (рис. 4). Реактивная мощность каждого звена фильтра равна 4 Мвар. Добротности реакторов одинаковы и равны 40. Потери мощности на частоте 50 Гц в первом звене составляют 23,2 кВт, а во втором звене – 11,5 кВт. Таким образом, при одинаковой реактивной мощности потери в низкочастотном звене оказываются в два раза больше.

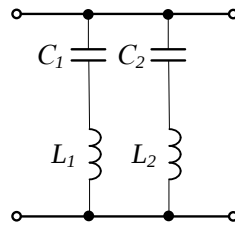


Рис. 4. Фильтр на основе узкополосных звеньев

Fig. 4. Filter with single-tuned branches

Высокие потери имеет и фильтр С-типа, настроенный на ослабление третьей гармоники.

Таким образом, для ослабления гармоник низкого порядка ($n = 2, 3$) необходимы иные конфигурации фильтров, обеспечивающих снижение потребляемой активной мощности не только в демпфирующем резисторе, но и в других элементах схемы, в первую очередь в реакторах.

Материалы и методы. Метод проектирования широкополосных фильтров с минимальными потерями в демпфирующем резисторе

Для получения новых конфигураций широкополосных фильтров используем базовую структуру ШПФ в форме односторонне нагруженного LC-четырёхполюсника (рис. 5). Такая структура ШПФ впервые была предложена в работах [17-19]. Представление широкополосного фильтра в виде реактивного четырёхполюсника позволяет использовать методы оптимального синтеза линейных частотно-избирательных цепей и получить с их помощью новые варианты ШПФ различного порядка с требуемыми характеристиками.

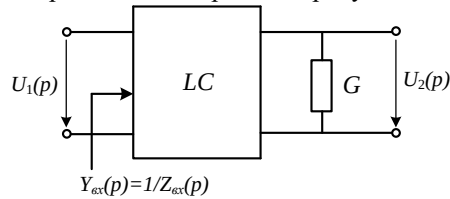


Рис. 5. LC-четырёхполюсник

Fig. 5. LC-two-port

Активная проводимость четырёхполюсника $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}$ и модуль комплексной передаточной функции $|T_{21}(j\omega)| = \dot{U}_2(j\omega)/\dot{U}_1(j\omega)$ связаны соотношением [17, 19]

$$\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\} = G|T_{21}(j\omega)|. \quad (2)$$

В соответствии с формулой (2) требуемую характеристику входной проводимости обеспечивает пассивный LC-фильтр, передаточная функция которого имеет нули в начале координат или на частоте основной гармоники:

$$T_{21}(p) = \frac{p^m}{D(p)}.$$

Здесь $D(p)$ – полином Гурвица.

В качестве примера на рис. 6 представлена схема лестничного ШПФ 5 порядка.

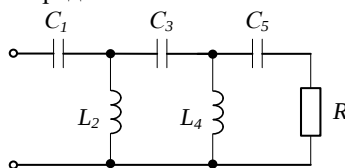


Рис. 6. Лестничный четырёхполюсник 5 порядка

Fig. 6. Ladder 5-th order two-port

Свойства лестничных четырехполюсников подробно рассмотрены в руководствах по синтезу пассивных фильтров [20]. В простейшем случае, когда ветви лестничной LC -цепи составляют одиночные емкостные или индуктивные элементы, нули передаточной функции $T_{21}(p)$ находятся в начале координат или бесконечности. Если поперечная или продольная ветви содержат последовательный или параллельный резонансный контур, то функция $T_{21}(p)$ имеет пару комплексно-сопряженных нулей на мнимой оси. Для снижения потерь в демпфирующем резисторе нули передачи $T_{21}(p)$ должны быть расположены в начале координат или на основной частоте.

Из сказанного следует, что для снижения потерь и уменьшения чувствительности функции входной проводимости можно увеличить порядок фильтра. Другой путь уменьшения потерь – включение в поперечную ветвь последовательного контура, настроенного в резонанс на частоту основной гармоники. На рисунках 7 и 8 показаны схемы широкополосных фильтров третьего и пятого порядка, в которых поперечная индуктивность заменена резонансным контуром. Контур целесообразно включать в первую поперечную ветвь фильтра. Это позволит уменьшить потери не только в демпфирующем резисторе, но и в остальных элементах фильтра.

Нетрудно видеть, что широкополосный фильтр 2 порядка (рис. 2) и фильтр С-типа (рис. 3) представляют собой простейшие варианты ШПФ лестничной структуры. Увеличение порядка фильтра дает возможность повысить селективность его характеристик, уменьшить потери, а также чувствительность к отклонениям значений элементов.

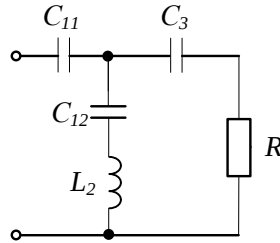


Рис. 7. Широкополосный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 7. Broadband third-order filter with a series resonant circuit in the shunt branch

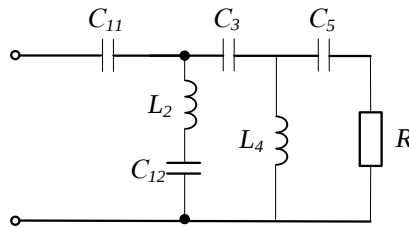


Рис. 8. Широкополосный фильтр пятого порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 8. Broadband fifth-order filter with a series resonant circuit in the shunt branch

Как правило, для расчета широкополосных фильтров второго порядка используются аналитические методы. Однако при увеличении порядка фильтра расчетные соотношения становятся слишком громоздкими, и в этом случае целесообразно использовать методы оптимального синтеза частотно-избирательных цепей.

Задачу синтеза ШПФ, имеющего требуемые компенсационные характеристики, будем рассматривать как задачу определения параметров реактивного четырехполюсника, при которых целевая функция

$$\Phi(\bar{x}) = \frac{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) Z_c(j\omega_k)|^2}{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2 =$$

$$\min, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\}$$

Широкополосный фильтр, имеющий минимальное значение критерия, определяемого выражением (3), обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармоник напряжения в точке подключения нелинейной нагрузки. В процессе минимизации критерия (3)

учитывается влияние внешней сети на характеристики фильтра. Активная мощность, фильтра регулируется с помощью ограничения-неравенства

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega_1)\}}{|Y_{\text{вх}}(j\omega_1)|} \leq \eta_0. \quad (4)$$

Ограничение (4) задает верхний предел активной мощности, потребляемой фильтром. Отношение активной и полной мощностей фильтра не превышает заданное значение. η_0

В табл. 1 приведены параметры нормированных ШПФ 3 и 5 порядка, полученных с помощью рассмотренной процедуры оптимизации для двух значений параметра η_0 . Частота настройки фильтра равна 3 рад/с. Оптимизация проводилась с помощью пакета *Optimization Toolbox* программного комплекса *MatLab*.

Таблица 1

Параметры нормированных ШПФ 3 и 5 порядка							
Порядок фильтра	η_0	C_1 , Ф	L_2 , Гн	C_3 , Ф	L_4 , Гн	C_5 , Ф	R
3	0,05	0,446	0,189	0,11	-	-	1
	0,1	0,383	0,220	0,11	-	-	1
5	0,05	0,448	0,168	0,1324	0,132	1	1
	0,1	0,382	0,197	0,1319	0,132	1	1

Параметры нормированных фильтров, представленные в табл. 1, могут использоваться при проектировании фильтров, имеющих заданные реактивную мощность и частоту настройки. Для этого необходимо провести масштабирование параметров нормированного фильтра по заданным частоте настройки и величине реактивной мощности.

Результаты и обсуждение

Проведем сравнительный анализ характеристик широкополосных демпфирующих фильтров, имеющих одинаковую частоту настройки, равную 150 Гц. Рассмотрим следующие варианты ШПФ.

1. Фильтр С-типа (рис. 3).
2. Лестничный фильтр третьего порядка.
3. Лестничный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рис. 7).
4. Лестничный фильтр пятого порядка (рис. 6).
5. Лестничный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рис. 8).

Фильтры имеют одинаковую реактивную мощность. Фильтр С-типа рассчитан с помощью алгоритма, предложенного в [11]. Для расчета лестничных фильтров использованы параметры в табл. 1. Значения элементов фильтров представлены в табл. 2. Частотные характеристики фильтров показаны на рис. 9. Характеристики лестничных фильтров одинакового порядка практически совпадают на частотах, превышающих 100 Гц.

Таблица 2

Значения элементов широкополосных фильтров							
Вар	C_{11} , мкФ	C_{12} , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	L_4 , мГн	C_5 , мкФ	R, Ом
1	22,2	177,6	57,1	-	-	-	270
2	22,2	-	38,5	5,48	-	-	65
3	22,2	263,0	38,5	5,48	-	-	65
4	22,2	-	34,5	6,59	26,9	49,8	70
5	22,2	294,0	34,5	6,59	26,9	49,8	70

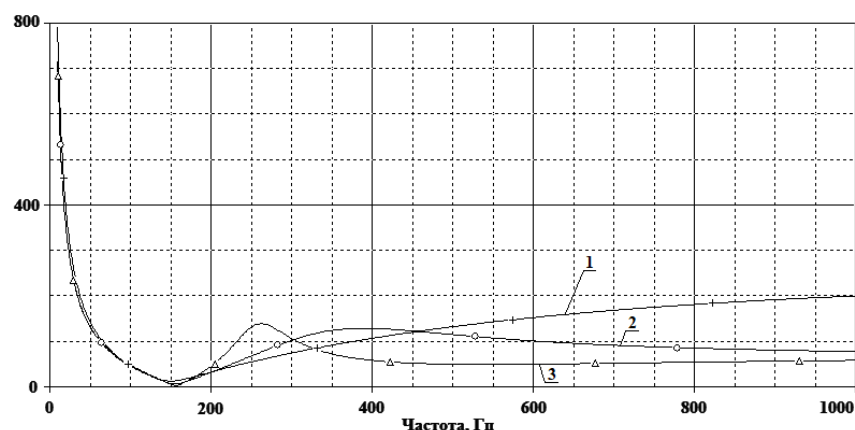


Рис. 9. Частотные характеристики широкополосных фильтров: 1 – С-типа, 2 – ШПФ третьего порядка, 3 – ШПФ 5 порядка

Fig. 9. Frequency characteristics of broadband filters: 1 – C-type, 2 – third order BBF, 3 – fifth order BBF

Значения потерь мощности в элементах фильтров на частоте основной гармоники приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вариант	Потери мощности в элементах фильтров, кВт		Суммарные потери
	в реакторах	в демпфирующем резисторе	
1	79	0,4	79,4
2	67	2	69
3	54	0	54
4	59	0	59
5	47,5	0	47,5

Результаты проведенного анализа показывают, что предлагаемые широкополосные фильтры имеют значительные технико-экономические преимущества перед фильтрами С-типа. Использование методов оптимального синтеза позволяет получить новые варианты широкополосных фильтров с требуемыми частотными характеристиками. Важное достоинство ШПФ 3-5 порядка заключается в том, что они потребляют значительно меньшую активную мощность по сравнению с известными структурами ПФГ. Включение резонансного контура в поперечную ветвь лестничного фильтра позволяет дополнительно снизить потери мощности в реакторах. При этом потери в демпфирующем резисторе на частоте 50 Гц снижаются практически до нуля.

Широкополосные фильтры 3-5 порядка целесообразно использовать в системах электроснабжения, значительную часть нагрузки которых составляют мощные электроприемники с нелинейными характеристиками. Это позволит нормализовать качество электроэнергии и одновременно повысить энергоэффективность компенсирующих устройств.

Заключение

Искаженные токи, создаваемые нелинейными нагрузками промышленных потребителей, имеют широкий спектр, включающий как характеристические, так и нехарактеристические гармоники. Применение традиционных узкополосных фильтров может вызвать резонансное усиление нехарактеристических гармоник. В системах электроснабжения промышленных предприятий целесообразно использовать широкополосные фильтры, обеспечивающие ослабление гармоник, а также демпфирование резонансных режимов в СЭС.

Основным видом пассивных фильтров, используемых в промышленных системах электроснабжения для нормализации качества электроэнергии являются фильтры С-типа. Их преимущество – малые потери мощности в демпфирующем резисторе на основной частоте. Однако фильтры С-типа, настроенные на подавление гармоник низкого порядка, имеют значительные потери мощности в реакторах.

В статье рассмотрено новое семейство широкополосных фильтров лестничной структуры, позволяющих уменьшить активную мощность, потребляемую элементами схемы. Показано, что известные варианты ШПФ, такие как фильтр С-типа, можно рассматривать как частные случаи предложенной структуры.

Анализ характеристик лестничных ШПФ 3-5 порядка показал, что они обеспечивают эффективную компенсацию характеристических и нехарактеристических гармоник, создаваемых многопульсными преобразователями. При этом предлагаемые фильтры имеют значительно меньшие потери в реакторах и демпфирующем резисторе, чем традиционные фильтры С-типа.

Литература

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
2. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России: текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: Передача и распределение. 2016. № 2 (35). С. 28-38.
3. Orcajo G.A., Aduro P., Rodrigues J., et al. Overcurrent protection response of a hot rolling mill filtering system: analysis of the process conditions. IEEE trans. on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 3. pp. 2596-2607.
4. Singh B., Gairola S., Singh B. N., Chandra A., Al-Haddad K. Multipulse AC-DC Converters for Improving Power Quality: A Review IEEE trans. on Power Electronics. 2008. V. 23. No. 1. pp. 260-281.
5. Badrzadeh B., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE trans. on Industry Applications. 2011. V. 47. N. 2. pp. 973-983.
6. Nascimento C., Watanabe E., Diene O., Dietrich A., Goedel A., Gyselinck J., Dias R. Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage. IEEE trans. on Power Delivery. 2017. V. 32. No. 2. pp. 951-961.
7. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE trans. on Power Delivery. 2017. V. 32. No. 1. pp. 117-124.
8. Das J. Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives – A Case Study. IEEE trans. on Industry Applications. 2015 V. 51. No. 2. pp. 1417-1426.
9. Allenbaugh M., Dionise T., Natali T. Harmonic Analysis and Filter Bank Design for a New Rectifier for a Cold Roll Mill. IEEE trans. on Industry Applications. 2013. V. 49. No. 3. pp. 1161-1170.
10. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020.V. 35. No. 4. pp. 1725-1734.
11. Horton R., Dugan R., Hallmark D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA. 7–10 May 2012. pp. 1–6.
12. Lamlom A. Ahmed Ibrahim, Balc A., M., Karadeniz A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
13. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. IEEE power and energy technology systems journal., 2018. V. 5. No. 2. pp. 65-72.
14. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. Energies. 2020. V.13. pp.2330. doi: 10.3390/en13092330.
15. Xu W., Ding T., Li X., Liang H., Resonance-free shunt capacitors configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. №. 5. pp. 2287–2295.
16. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery. 2018. V. 33. No. 4. pp. 1973–1980,
17. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В. В., Звягинцев Е. С. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество. 2018. № 12. С. 14-21.
18. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями Электротехника. 2020. № 5. с. 47-51.
19. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
20. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей: СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.

Авторы публикации

Боярская Наталья Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «ТОЭ», Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru.

Довгун Валерий Петрович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: vdovgun55@mail.ru, vdovgun@sfu-kras.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: denis.egorov.90@br.ru, deegorov@sfu-kras.ru.

Новиков Виктор Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: nvv@iksib.ru.

Шандрыгин Денис Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: Shandrigin2012@yandex.ru.

References

1. Zhezhelenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyati*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
2. Kovernikova LI, Tulckiy VN, Shamonov RG. Katchestvo elektrenergii v EES Rosii, tekustchie problem i neobkhodimye resheniya. *Elektroenergiya. Peredatcha i raspredelenie*. 2016;2 (35):28-38.
3. Orcajo GA, Adruga P, Rodrigues J, et al. *Overcurrent protection response of a hot rolling mill filtering system analysis of the process conditions*. IEEE trans. on industry applications. 2017;53(3):2596-2607.
4. Singh B, Gairola S, Singh BN, et al. *Multipulse AC–DC Converters for Improving Power Quality: A Review* IEEE trans. on Power Electronics. 2008;23(1):260-281.
5. Badrzadeh B, Smith K, Wilson R. *Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant*. IEEE trans. on industry applications. 2011;47(2):973-983.
6. Nascimento C, Watanabe E, Diene O, et al. *Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage*. IEEE trans. on Power Delivery. 2017; 32(2):951-961.
7. Li X, Xu W, Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. IEEE trans. on Power Delivery. 2017;32(1):117-124.
8. Das J. *Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives A Case Study*. IEEE trans. on Industry Applications. 2015;51(2):1417-1426.
9. Allenbaugh M, Dionise T, Natali T. *Harmonic Analysis and Filter Bank Design for a New Rectifier for a Cold Roll Mill*. IEEE trans. on Industry Applications. 2013;49(3):1161-1170.
10. Wang Y, Xu S, Xu W, et al. *Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2020;35(4):1725-1734.
11. Horton R., Dugan R., Hallmark D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.
12. Lamom A, Ahmed Ibrahim A, Balc M, et al. *Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
13. Zhang G, Wang Y, Xu W, Sitther E. *Characteristic parameter-based detuned C-type filter design*. IEEE power and energy technology systems journal. 2018;5:2:65-72.
14. Lange A, Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. *Energies*, 2020;13:2330; doi: 10.3390/en13092330.
15. Xu W, Ding T, Li X, et al. *Resonance-free shunt capacitors configurations, design methods and comparative analysis*. IEEE Trans. on Power Delivery. 2016;31(5):2287–2295.
16. Wang Y, Xu W, A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors. IEEE Trans. Power Delierly. 2018;33(4):1973–1980.
17. Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, et al. Parametritcheskii sintez shirokopklosnyh filtrov. *Elektrichestvo*. 2018;12:14-21.

18. Dovgun VP, Egorov DE. Shirokogokosnyye silovye filtry dlya system elektrosnabgeniya s mnogofaznymi preobrazovatelyzmi. *Elektrotekhnira*. 2020;5:47-51.

19. Egorov DE, Dovgun VP, Boyzrskaya NP, et al. Korrekciya koefficienta moshnosti v sistemakh s mnogofaznymi nelineynyvi nagruzkami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020;22:6:3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

20. Ulakhovich DA. Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh cepey: ucheb.posobie. SPb.: BXV-Peterburg, 2009. 816 p.

Authors of the publication

Nataliya P. Boyarskaya – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia.

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Viktor V. Novikov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis A. Shandrigin – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено **12.12.2021 г.**

Отредактировано **13.12.2021 г.**

Принято **14.12.2021 г.**



УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Крюков^{1,2} А.В., Любченко² И.А.

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка методики моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами для улучшения качества электроэнергии в сетях, питающих стационарные объекты железнодорожного транспорта. Рассматривалось два конструктивных решения, обеспечивающих снижение несимметрии и отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих эти объекты. Первое из них базировалось на применении отсасывающих трансформаторов, а второе – на использовании линий с заземленной фазой. Рассматривалось два способа включения данных трансформаторов: в изолирующие стыки рельсов и в обратный провод. МЕТОДЫ. Исследования проведены с помощью программного комплекса Fazonord, обеспечивающего комплексное моделирование в фазных координатах режимов систем электроснабжения. Для определения влияния отсасывающих трансформаторов и линий с заземленной фазой на показатели качества электроэнергии рассмотрена межподстанционная зона тяговой сети двухпутного участка переменного тока 25 кВ протяженностью 45 км. РЕЗУЛЬТАТЫ. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при использовании отсасывающих трансформаторов, которые включались в рассечку рельсов, среднее значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанции объекта уменьшалось на 2,5 % по сравнению с отсутствием таких устройств; при наличии трансформаторов, которые включались в обратный провод, данный показатель снижался на 19 %. Применение линий с заземленной фазой вместо линии «два провода – рельс» позволило улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ, при этом максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности снижался на 40 %. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе компьютерного моделирования показано, что применение отсасывающих трансформаторов с обратным проводом и линий 25 кВ с заземленной фазой позволяет улучшить качество электроэнергетики в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: системы электроснабжения стационарных объектов железных дорог; отсасывающие трансформаторы; линии электропередачи с заземленной фазой и «два провода – рельс».

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № 0667-2020-0039).

Для цитирования: Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 53-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65.

IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF STATIONARY OBJECTS OF RAILWAY TRANSPORT

AV. Kryukov^{1,2}, IA. Lyubchenko²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Development of a methodology for modeling the modes of power supply systems for railways equipped with devices to improve the quality of electricity in the networks supplying stationary objects of railway transport. Two design solutions were considered

that ensure the reduction of unbalance and voltage deviations on the 0,4 kV buses of substations supplying these objects. The first of them was based on the use of suction transformers, and the second - on the use of lines with a grounded phase. METHODS. The studies were carried out using the Fazonord software package, which provides complex modeling in phase coordinates of the modes of power supply systems. RESULTS. The results obtained made it possible to draw the following conclusions: when using suction transformers, which were included in the rail cut, the average value of the unbalance coefficient in negative sequence on the 0.4 kV buses of the object's substation decreased by 2,5% compared to the absence of such devices; in the presence of transformers, which were included in the return wire, this indicator decreased by 19%. The use of lines with a grounded phase instead of a two-wire-rail line made it possible to improve the quality of electricity on 0.4 kV buses, while the maximum of the unbalance coefficient in the negative sequence was reduced by 40%. CONCLUSION. On the basis of computer modeling, it is shown that the use of suction transformers with a return wire and 25 kV lines with a grounded phase makes it possible to improve the quality of the electric power industry in the power supply systems of stationary objects of railway transport.

Key words: power supply systems for stationary railway facilities, drop-off transformers, power lines with a grounded phase and «two wires-rail».

For citation: Kryukov AV, Lubchenko IA. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):53-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65.

Acknowledgments: This work was financially supported by a grant from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (project No. 0667-2020-0039).

Введение и литературный обзор

Электроснабжение железных дорог осуществляется от сетей 110-220 кВ электроэнергетических систем через тяговые подстанции (ТП), от которых получают питание устройства электрической тяги и стационарные железнодорожные потребители. К ним относятся ремонтные заводы, локомотивные и вагонные депо, железнодорожные станции и т. д. [1, 2]. В данную группу также входят устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), которые предназначены для управления движением поездов и повышения пропускной и провозной способностей железнодорожных магистралей. Об актуальности задач повышения надежности электроснабжения объектов СЦБ, а также улучшения качества электроэнергии свидетельствуют результаты анализа статистики по сети дорог России. Из-за нарушений электроснабжения сигнальных точек СЦБ ежегодно происходит вынужденная задержка движения нескольких тысяч поездов [2]. Это свидетельствует об актуальности задач повышения надежности электроснабжения объектов СЦБ, а также улучшения качества электроэнергии.

Кроме того, от обмоток 6-10-35 кВ ТП могут получать питание промышленные, сельскохозяйственные и жилищно-коммунальные объекты, для потребителей которых вопросы обеспечения высокого качества электроэнергии также имеют первостепенное значение.

Исследованию систем электроснабжения (СЭС) стационарных объектов железнодорожного транспорта посвящено значительное количество работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье. Общие вопросы, связанные с построением таких СЭС, рассмотрены в работах [1-4]. Решению задач повышения надежности сетей, питающих стационарные объекты транспорта, посвящены статьи [5-9]. Вопросы моделирования и управления режимами СЭС стационарных объектов рассмотрены в публикациях [10-17]. Задачи повышения энергоэффективности и качества электроэнергии в системах электроснабжения указанных объектов представлены в работах [18-22].

В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики задачи улучшения качества электроэнергии в СЭС стационарных объектов должны решаться на основе компьютерного моделирования. Такое моделирование может быть реализовано на основе методов и средств, разработанных в ИрГУПС [16, 20]. Ниже представлена методика моделирования систем электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях стационарных объектов железнодорожного транспорта. Рассматривались два конструктивных решения, обеспечивающих снижение несимметрии и отклонений напряжения на шинах 0,4 кВ подстанций, питающих потребителей стационарных объектов. Первое из них базировалось на применении отсасывающих трансформаторов, а второе – на использовании линий с

заземленной фазой. Рассматривалось два способа включения указанных трансформаторов: в изолирующие стыки рельсов и в обратный провод.

Методы моделирования

Для определения режимов системы электроснабжения (СЭЖД) магистральной железной дороги необходимо сформировать модели отдельных элементов: линий электропередачи, контактных сетей, трансформаторов, устройств компенсации реактивной мощности и т. д. Кроме того, необходимо создание алгоритма взаимодействия этих моделей. Процесс формирования модели СЭЖД для расчета режимов включает следующие этапы [16]:

- обработка графика движения поездов, который связывает координату положения поезда со временем (рис. 1);
- формирование ряда мгновенных схем, каждая из которых отвечает положению отдельных поездов в пространстве для рассматриваемого момента времени; при этом учитываются величины тяговых и стационарных нагрузок;
- определение режима каждой мгновенной схемы;
- формирование сводных результатов моделирования в виде таблиц и графических зависимостей параметров от времени.

На основе данного подхода формируются информационные массивы, характеризующие динамику изменения режимов СЭЖД, вызванную движением поездов. Кроме того, возможен учет изменений стационарных нагрузок. На основе этой информации возможно определить уровни напряжений в узловых точках сети, коэффициенты, характеризующие величину несимметрии, показатели, отвечающие гармоническим искажениям, а также расходы активной и реактивной энергии по выбранным присоединениям и СЭЖД в целом.

Нагрузки, создаваемые движущимися поездами, находятся на основе тяговых расчетов или путем обработки экспериментальных данных.

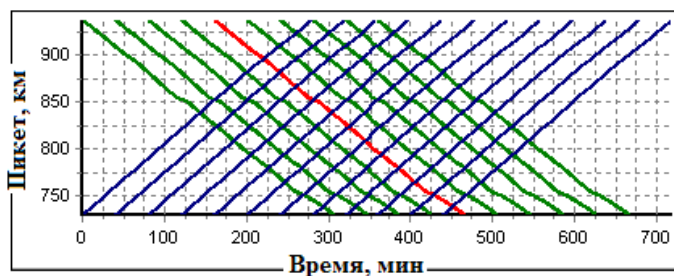


Рис. 1 График движения поездов

Fig. 1 Train schedule

Способы адекватного моделирования элементов СЭЖД, учитывающие электромагнитные взаимодействия, и основные принципы имитационного моделирования приведены в работе [16].

Алгоритм формирования мгновенной схемы базируется на данных тяговых расчетов и анализе графиков движения поездов. Он включает следующие этапы:

- для заданного момента времени определяется положение каждого поезда;
- рассчитываются активные и реактивные мощности нагрузки в узлах, соответствующих расположению поездов;
- переопределяются параметры, отвечающие протяженностям элементов контактной сети (КС);
- параметры моделей элементов КС пересчитываются;
- выполняется присоединение этих моделей к стационарной части расчетной схемы.

На основе такой методики, реализованной в программном комплексе Fazonord, возможно корректное решение следующих задач, актуальных при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения:

- определение динамики изменений уровней напряжения на зажимах потребителей;
- расчет показателей, характеризующих несимметрию напряжений по обратной и нулевой последовательностям;
- анализ влияния размеров движения поездов на показатели качества электрической энергии по отклонениям и несимметрии;
- расчет показателей, характеризующих гармонические искажения токов и напряжений, которые возникают из-за влияния нелинейных тяговых нагрузок, создаваемых выпрямительными электровозами;
- анализ энергоэффективности процессов передачи и распределения электроэнергии путем расчета ее потерь в отдельных элементах системы электроснабжения и СЭС в целом;

- определение динамики изменения температур нагревов проводов ЛЭП и тяговых сетей;
- расчет нагревов и теплового износа изоляции силовых трансформаторов;
- анализ эффективности применения установок продольной и поперечной компенсации реактивной мощности;
- расчеты токов и напряжений для любых видов коротких замыканий, в неполнофазных режимах, а также при сложных повреждениях в электрической сети, характеризующихся возникновением продольных и поперечных несимметрий;
- определение наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи и связи, а также на протяженных металлических конструкциях;
- расчет электромагнитных полей на трассах линий электропередачи и в распределительных устройствах подстанций.

Программный комплекс *Fazonord* позволяет моделировать активные элементы электроэнергетических систем, построенных с использованием технологий *smart grid* [23]. К числу таких элементов можно отнести:

- установки распределенной генерации;
- устройства *FACTS*;
- многофазные линии электропередачи;
- газоизолированные и криогенные ЛЭП;
- фазоповоротные устройства;
- токоограничители;
- управляемые устройства для устранения несимметрии;
- активные кондиционеры высших гармоник;
- кабельные линии подземной прокладки с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена.

Результаты моделирования. Отсасывающие трансформаторы.

Для снижения напряжений магнитных влияний на смежные линии в тяговых сетях 25 кВ используются отсасывающие трансформаторы (ОТ). Они повышают электромагнитные связи между контактной сетью (КС) и рельсами. Это приводит к тому, что тяговые токи начинают протекать по рельсам или специальному обратному проводу вместо возврата через землю. Расстояние между КС и цепью обратного тока уменьшается, что вызывает снижение магнитного поля КС и наведенных напряжений на смежные линии. Включение ОТ может осуществляться по двум вариантам: в первом – вторичная обмотка ОТ присоединяется к рельсовой сети (рис. 2 а); во втором – к специальному обратному проводу (рис. 2 б).

Отсасывающие трансформаторы характеризуются коэффициентом трансформации, равным единице. Сопротивления нагрузки вторичной обмотки зависит от варианта подключения:

- для схемы, представленной на рис. 2 а, оно оставляет доли Ома;
- для схемы, показанной на рис. 2 б, этот параметр лежит в диапазоне от 1...3 Ом.

Поэтому, также как у трансформаторов тока, режим работы ОТ близок к короткому замыканию. В обеих схемах, приведенных на рис. 2, токи, протекающие по обмоткам ОТ являются противофазными, а напряжения обмоток сравнительно небольшие.

Чтобы обратный провод использовался наиболее эффективно, он должен располагаться как можно ближе к контактной подвеске. Эффективность систем электроснабжения с ОТ зависит и от количества трансформаторов, установленных в межподстанционной зоне (МПЗ). Для типовой МПЗ протяженностью 40...50 км расстояние между ОТ, включенными в рассечку рельсов, принимается равным 3 км, а для ОТ, по схеме рис. 2 б – 4,5 км.

Эффективность применения ОТ для снижения наведенных напряжений проанализировано в работе [24]. Однако влияние ОТ на качество электроэнергии на шинах подстанций стационарных объектов ЖД в указанной работе не рассматривалось. Результаты компьютерных исследований, направленных на решение этой задачи, приведены ниже. В качестве объекта исследований взята типовая межподстанционная зона двухпутного участка железной дороги протяженностью 45 км. Рассматривалась контактная подвеска 25 кВ с контактным проводом (КП) типа МФ 100 и несущим тросом (НТ) марки ПБСМ 95, рельсы Р-65 и линия «два провода–рельс» (ДПР), выполненная проводами А-70.

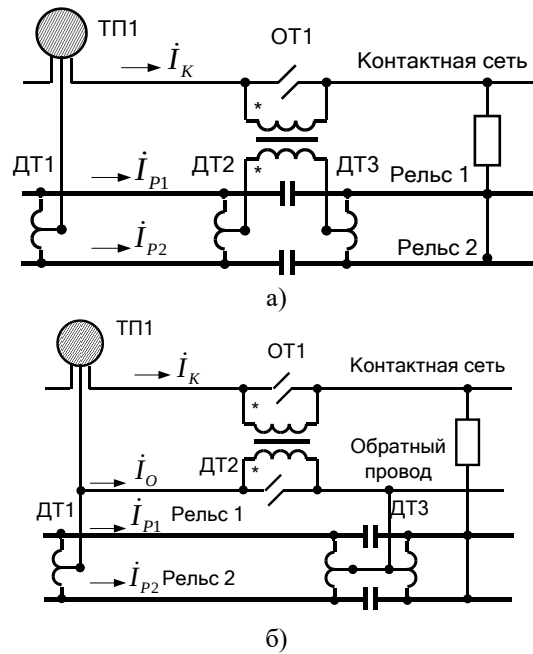


Рис. 2 Схемы включения ОТ: а – включение ОТ в изолирующие стыки рельсов; б – ОТ с обратным проводом; ДТ1...ДТ3 – дроссель-трансформаторы

Fig. 2 Connection diagrams for sucking transformers (ST): a - inclusion of ST in the insulating joints of the rails; b - ST with a return wire; DT1 ... DT3 - choke-transformers

Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord. Рассматривалось движение пяти нечетных поездов массой 6300 т (рис. 3, 4) с токовым профилем, показанным на рисунке 5.

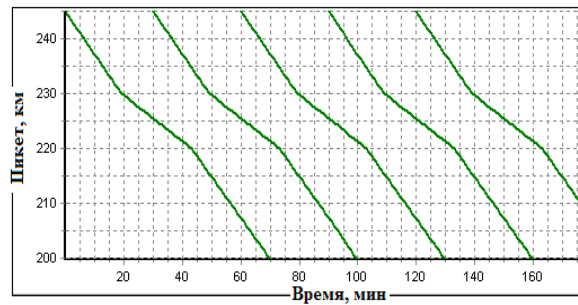


Рис. 3 Полный график движения поездов

Fig. 3 Complete train schedule

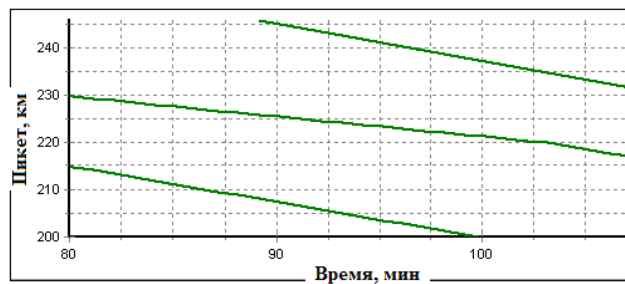


Рис. 4 График движения поездов в рассматриваемом интервале 80...110 мин

Fig. 4 Train schedule in the considered interval 80 ... 110 min

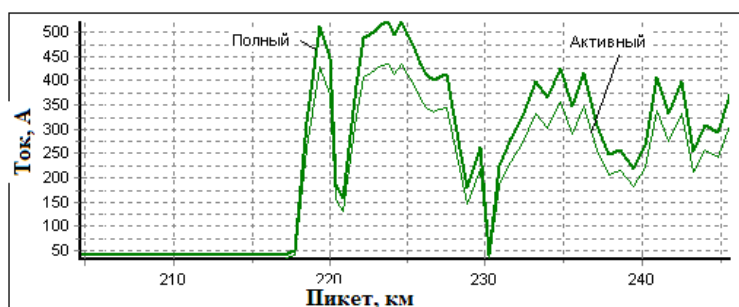


Рис. 5 Токвый профиль поезда массой 6300 т

Fig. 5 Current profile of a train weighing 6300 t

Моделирование работы СЭЖД проведено в трех вариантах:

- 1) тяговая сеть (ТС) 25 кВ без отсасывающих трансформаторов;
- 2) ТС включала ОТ с обратным проводом, расположенные через 4,5 км;
- 3) ТС имела ОТ, которые подключались в изолирующее сопряжение рельсов через 3 км.

На рисунке 6 показаны координаты расположения токоведущих частей в поперечном сечении тяговой сети. На рисунках 7 –9 приведены расчетные схемы, отвечающие указанным выше вариантам моделирования, результаты которого представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 10 и 11.

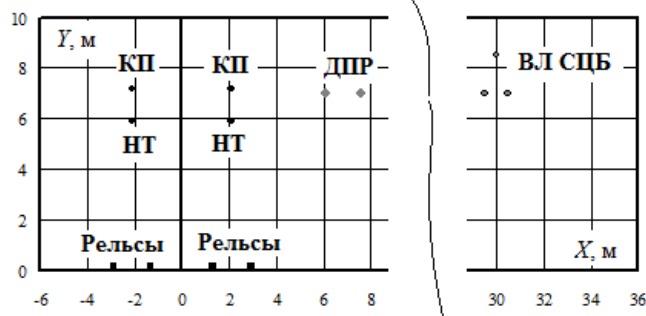


Рис. 6 Координаты токоведущих частей

Fig. 6 Coordinates of live parts

Таблица 1

Коэффициенты несимметрии напряжений k_{2U} , %, на шинах 0,4 кВ

Параметр	Схема ТС			Различие, %	
	Нет ОТ	ОТ, включенные в рассечку рельсов	ОТ с обратным проводом	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
Минимум	2,03	1,92	1,89	5,4	6,9
Среднее	5,55	5,42	4,49	2,5	19,2
Максимум	9,11	9,15	7,55	-0,4	17,1
Среднеквадратическое отклонение (СКО)	2,11	2,14	1,60	-1,1	24,1
Размах	7,08	7,23	5,66	-2,1	20,1

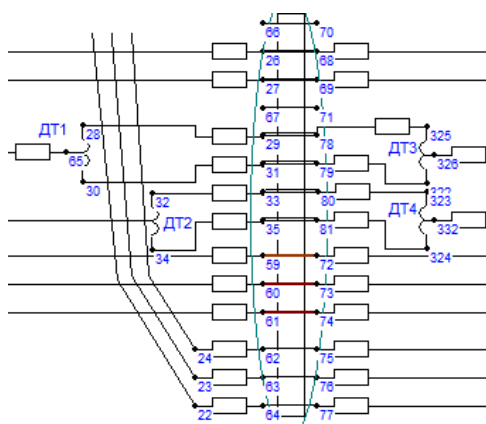


Рис. 7 Фрагмент расчетной схемы без отсасывающих трансформаторов

Rice. 7 A fragment of the design scheme without suction transformers

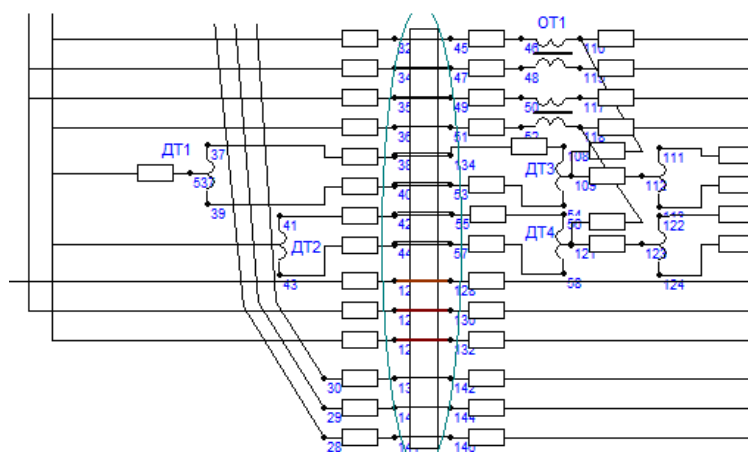


Рис. 8 Фрагмент расчетной схемы с отсасывающими трансформаторами и обратным проводом

Fig. 8 Fragment of the design diagram with sucking transformers and a return wire

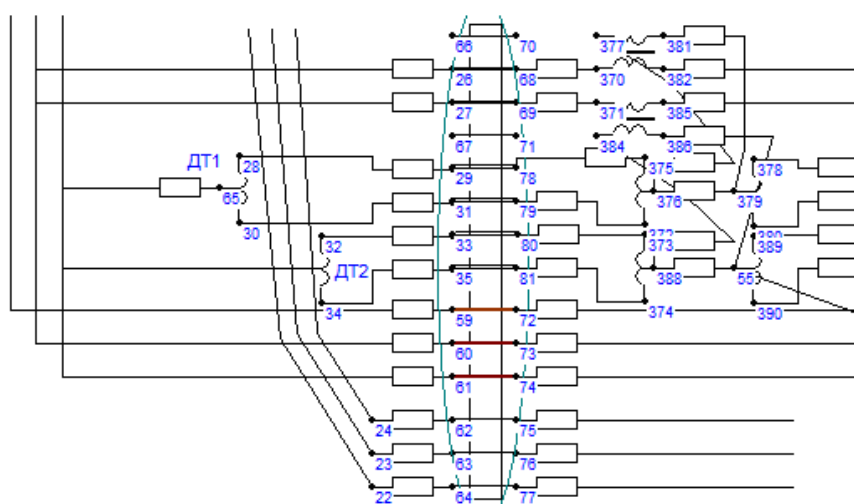
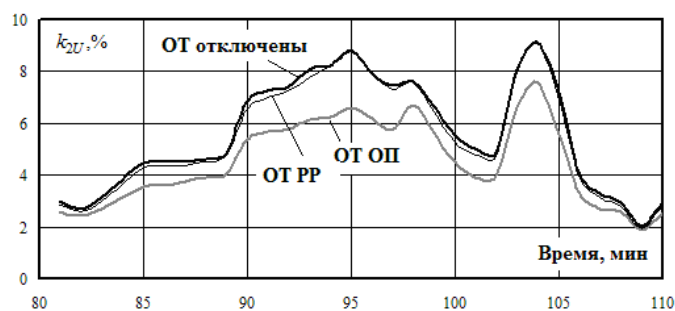
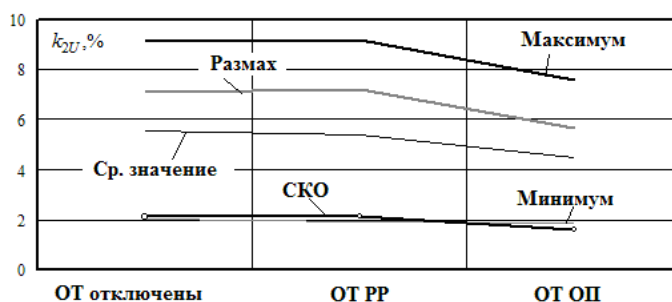


Рис. 9 Фрагмент расчетной схемы с ОТ, включенными в расщел

Таблица 2

Коэффициенты несимметрии напряжений k_{0U} , %, на шинах 0,4 кВ

Параметр	Схема ТС			Различие, %	
	Нет ОТ	ОТ с обратным проводом	ОТ, включенные в рассечку рельсов	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
Минимум	0,09	0,04	0,04	50,2	50,1
Среднее	0,21	0,16	0,20	25,4	7,3
Максимум	0,38	0,28	0,38	26,6	-0,1
СКО	0,09	0,06	0,09	29,9	-4,7
Размах	0,29	0,23	0,33	19,3	-15,6

Рис. 10 Зависимость коэффициента несимметрии k_{2U} от времениFig. 10 Dependence of the asymmetry coefficient k_{2U} on timeРис. 11 Сводные показатели по коэффициенту несимметрии k_{2U} , %Fig. 11 Summary indicators for the asymmetry coefficient k_{2U} , %

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

– по сравнению с отсутствием ОТ, оснащение тяговой сети отсасывающими трансформаторами, включенными в рассечку рельсов, приводит к тому, что среднее значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на вторичной обмотке трансформатора ДПР уменьшается незначительно, всего на 2,5 %; а максимальное значение практически не изменяется (табл. 1);

– гораздо больший эффект наблюдается в ТС, оснащенной ОТ, которые включаются в обратный провод; при этом среднее значение коэффициента k_{2U} понижается на

19 %, а максимум – на 17 %; кроме того, имеет место заметное уменьшение показателей, характеризующих динамику изменений параметра k_{2U} , СКО уменьшается на 24 %, а размах колебаний – на 20 %; однако уровень несимметрии на шинах 0,4 кВ подстанции потребителя превышает допустимые пределы, что требует применения дополнительных средств для ее уменьшения, например, управляемых источников реактивной мощности [20];

– коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности при симметричной нагрузке трансформатора ДПР не превышают 1 %; использование ОТ с обратным проводом приводит к снижению среднего значения этого показателя на 25 %, а максимума – на 27 %.

Линии с заземленной фазой

В условиях электромагнитного влияния контактной сети линии ДПР имеют существенные недостатки. За счет магнитного влияния КС в проводах этой линии возникает продольная ЭДС, искажающая симметрию треугольника напряжений. Величина этой ЭДС определяется токами, протекающими по проводам контактной сети.

На практике часто не обеспечиваются необходимые уровни напряжения на подключенных к шинам 0,4 кВ подстанций ДПР устройствах железнодорожной автоматики

и связи, что приводит к их отказам. Кроме того, дополнительные нагрузки рельсов, которые выступают в качестве третьего провода ДПР, негативно влияют на работу рельсовых цепей. Также, при определенных условиях, проанализированных в работе [16], работа линий ДПР в режиме холостого хода может вызывать мощные резонансные явления.

Новая конструкция линии ДПР – линия с заземленной фазой (ЛЗФ-25 кВ, рис. 12) предложена в работе [25]. Она обеспечивает уменьшение электромагнитных влияний КС, что подтверждается опытной эксплуатацией участка такой линии на Северо-Кавказской железной дороге. Однако вопросы количественной оценки влияния ЛЗФ на качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ, питающих стационарные объекты рассмотрены не в полном объеме.

Для определения эффективности линий ЛЗФ по критерию качества электроэнергии выполнено моделирование режимов на модели, полученной путем модификации схемы, представленной на рис. 7. Результаты моделирования показаны в табл. 3 и на рис. 13 – 16.

Таблица 3

Сравнение ДПР и ЛЗФ по качеству электроэнергии

Параметр	$k_{2U}, \%$			$k_{0U}, \%$		
	ЛЗФ	ДПР	Различие, %	ЛЗФ	ДПР	Различие, %
Минимум	1,90	2,03	–6,8	0,1	0,1	–0,2
Среднее	4,23	5,55	–31,5	0,2	0,2	–40
Максимум	6,52	9,11	–39,7	0,2	0,4	–65
СКО	1,39	2,11	–52,0	0,1	0,1	–66
Размах	4,62	7,08	–53,3	0,1	0,3	–104

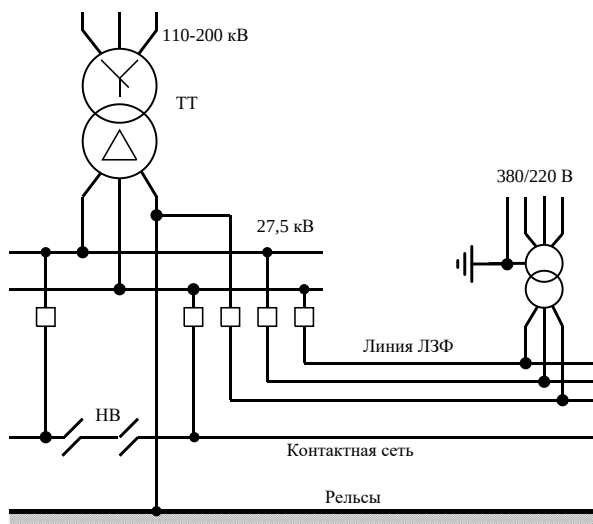
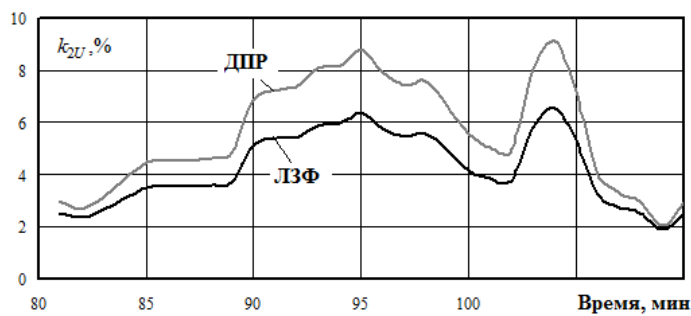


Рис. 12 Схема ЛЗФ

Fig. 11 Line diagram with grounded phase

Рис. 13 Зависимости коэффициентов несимметрии k_{2U} от времениFig. 13 Dependences of asymmetry coefficients k_{2U} on time

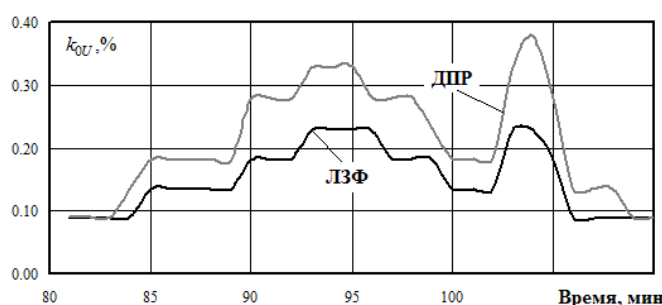


Рис. 14 Зависимости коэффициентов несимметрии k_{0U} от времени

Fig. 14 Dependences of the asymmetry coefficients k_{0U} on time

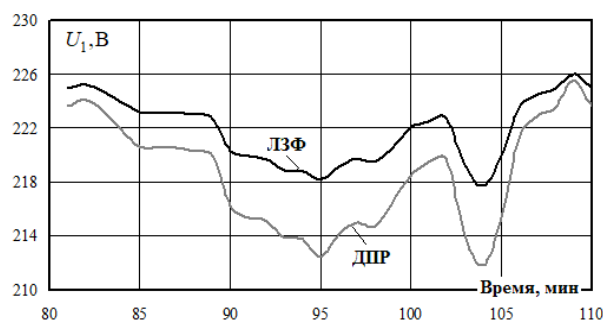


Рис. 15 Зависимости напряжений прямой последовательности от времени

Fig. 15 Dependences of positive sequence voltages on time

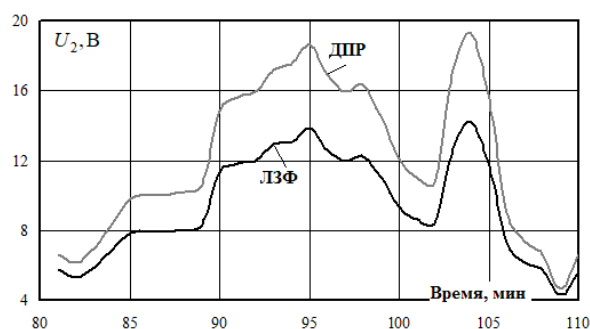


Рис. 16 Зависимости напряжений прямой последовательности от времени

Fig. 16 Dependences of positive sequence voltages on time

Полученные результаты показывают, что применение линий ЛЗФ вместо ДПР позволяет улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций СЦБ, при этом максимум коэффициента несимметрии по обратной последовательности снижается на 40 %. Аналогичный показатель по параметру k_{0U} уменьшается на 65 %.

Заключение

Разработана методика компьютерного моделирования, позволяющая определять эффективность применения отсасывающих трансформаторов и линий 25 кВ с заземленной фазой для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта.

Результаты моделирования показали, что применение отсасывающих трансформаторов в тяговой сети приводит к снижению несимметрии напряжений 0,4 кВ подстанций стационарных объектов. Использование отсасывающих трансформаторов, включенных в рассечку рельсов, обеспечивает уменьшение среднего значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на вторичной обмотке трансформатора ДПР примерно на 2,5 %. При наличии отсасывающих трансформаторов с обратным проводом коэффициент несимметрии по обратной последовательности снижается почти на 20 %.

Применение линий с заземленной фазой вместо ДПР позволяет улучшить качество электроэнергии на шинах 0,4 кВ подстанций СЦБ, при этом максимум коэффициента

несимметрии по обратной последовательности снижается на 40 %. Аналогичный показатель по параметру k_{0U} уменьшается на 65 %.

Разработанная методика моделирования может применяться для решения практических задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта, в частности, для выбора рациональных мероприятий по улучшению качества электроэнергии. В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики ее можно использовать при формировании программных модулей определения электрических режимов СЭС при разработке киберфизических систем электроснабжения нетяговых потребителей, основанных на использовании концепции цифровых двойников [26-28].

Литература

1. Крюков А. В., Закарюкин В. П. Электроснабжение и электропитание нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Москва. Берлин: Директ-Медиа, 2020. 293 с.
2. Аржанников Б.А., Сергеев Б.С., Набойченко И.О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 101 с.
3. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
4. Бондаренко К.А., Авдеева К.В. Энергоснабжение нетяговых железнодорожных потребителей. Омск, 2019. 36 с.
5. Каштанов А.Л., Ананьева Н.Г. Электрические распределительные сети железнодорожных узлов. Проблемы и пути их решения // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 79-87.
6. Шеломенцев А.О., Косяков А.А. Совершенствование организации проектирования систем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта и распределительных сетей общего пользования // Инновационный транспорт. № 5 (6). 2012. С. 15-19.
7. Мухарямов Р.И., Добрынин Е.В., Окладов С.А. Автоматизация контроля текущего состояния системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта // Наука и образование транспорту. № 1. 2015. С. 136-138.
8. Лабунский Л.С. Совершенствование технологии обслуживания устройств электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. № 3. 2005. С. 30-35.
9. Валияхметова В.К., Николаев В.Л., Власова В.А. Повышение надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Современные инновации в науке, образовании и технике. 2018. С. 27-29.
10. Tretyakov E. Advanced methods of transportation and distribution of electrical power in smart power grids of railways // MATEC Web of Conferences. V. 239, 01010.2018. 11. Cheremisin V., Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways // MATEC Web of Conferences. V. 239,01011. 2018.
12. Tretyakov E., Cheremisin V. and Golovnev G. Modeling of Multi-agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.2018. V. 982. Springer, Cham.
13. Tretyakov E., Golovnev, G. Voltage control in distribution electric rail networks using reactive power sources based on agent-based approach // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019.
14. Tretyakov E.A. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 643, 2019.
15. Tretyakov, E.A. Testing the software and hardware complex for managing the power supply system of stationary consumers of railways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.2020. V. 976(1).
16. Закарюкин В.П., Крюков. А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 2005. 273 с.
17. Черемисин В.Т., Комяков А.А. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта. Омск, 2017. 161 с.
18. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А.В. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях нетяговых потребителей // Известия Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 48-54.
19. Авилов В.Д., Третьяков Е.А., Краузе А. В. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник.

2013. № 1 (117). С. 183-187.

20. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / М.; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 183 с.

21. Карабанов М.А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов // Известия Транссиба. № 3 (7). 2011. С. 58-67.

22. Куликова Е.А., Бебрис А.Н. Инновационное оборудование для повышения энергоэффективности систем электроснабжения нетяговых потребителей // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Нефтекамск, 2017. С. 18-23.

23. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.

24. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных устройствами для уменьшения электромагнитных влияний на смежные линии электропередачи // Транспорт: наука, техника, управление. № 9. 2016. С. 12-18.

25. Бочев А.С., Финоченко Т.Э. Модернизация линий продольного электроснабжения два провода – рельсы // Вестник РГУПС. № 4. 2006. С. 87-90.

26. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Проблемы уязвимости и живучести киберфизических электроэнергетических систем // Энергетическая политика. № 5. 2018. С. 53-61.

27. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н. ИТ - инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // Известия РАН. Энергетика. № 1. 2021. С. 3-13.

28. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2020. № 13(6). С. 677-689.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Любченко Ирина Алексеевна – аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения.

References

1. Kryukov AV, Zakaryukin VP. *Elektrosnabzhenie i `elektropitanie netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta*. Moskva. Berlin: Direkt-Media, 2020. 293 P.

2. Arzhannikov BA, Sergeev BS, Nabojchenko IO. *Sistemy `elektrosnabzheniya ustrojstv SCB*. Ekaterinburg 2009. 101 P.

3. Steimel A. *Electric traction motive power and energy supply*. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 P.

4. Bondarenko KA, Avdeeva KV. *Energосnabzhenie netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebitelej*. Omsk, 2019. 36 P.

5. Kashtanov AL, Anan'eva NG. *Elektricheskie raspredelitel'nye seti zheleznodorozhnykh uzlov. Problemy i puti ih resheniya*. *Izvestiya Transsiba*. 2018; 1 (33): 79-87.

6. Shelomencev AO, Kosyakov AA. Sovershenstvovanie organizacii proektirovaniya sistem `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta i raspredelitel'nykh setej obshchego pol'zovaniya. *Innovacionnyj transport*. 2012; 5 (6): 15-19.

7. Muharyamov RI, Dobrynin EV, Okladov SA. Avtomatizaciya kontrolya tekushego sostoyaniya sistemy `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2015; 1: 136-138.

8. Labunskij LS. Sovershenstvovanie tehnologii obsluzhivaniya ustrojstv `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog. *Vestnik Samarskoj gosudarstvennoj akademii putej soobscheniya*. 2005; 3: 30-35.

9. Valiyahmetova VK, Nikolaev VL, Vlasova VA. Povyshenie nadezhnosti `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej zheleznykh dorog. *Sovremennye innovacii v nauke, obrazovanii i tehnike*. 2018: 27-29.

10. Tretyakov E. Advanced methods of transportation and distribution of electrical power

in smart power grids of railways. *MATEC Web of Conferences*, V. 239, 01010.2018. doi:10.1051/mateconf/201823901010.

11. Cheremisin V, Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways. *MATEC Web of Conferences*. V. 239.01011. 2018. doi:10.1051/mateconf/201823901011.

12. Tretyakov E, Cheremisin V. and Golovnev G. Modeling of Multi-agent Voltage Control in Distribution Electric Networks of Railways. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. V. 982. Springer, Cham.

13. Tretyakov E, Golovnev G. Voltage control in distribution electric rail networks using reactive power sources based on agent-based approach. *Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2019.

14. Tretyakov EA. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 643.

15. Tretyakov EA. Testing the software and hardware complex for managing the power supply system of stationary consumers of railways. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing. 2020. V. 976(1).

16. Zakaryukin VP, Kryukov AV. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy `elektricheskikh sistem*. Irkutsk, 2005.273 P.

17. Cheremisin VT, Komyakov AA. *Modelirovanie processov `elektropotrebleniya v sisteme netyagovogo `elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta*. Omsk, 2017.161 P.

18. Avilov VD, Tretyakov EA, Krauze AV. Povyshenie kachestva `elektro`energii v raspredelitel'nykh setyakh netyagovykh potrebitel'ey. *Izvestiya Transsiba*. 2013; 1 (13): 48-54.

19. Avilov VD, Tretyakov EA, Krauze AV. Upravlenie kachestvom `elektro`energii v raspredelitel'nykh setyakh zheleznodorozhnogo transporta. *Omskij nauchnyy vestnik*. 2013; 1(117): 183-187.

20. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Lyubchenko IA. *Uluchshenie kachestva `elektro`energii v sistemah `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitel'ey zheleznnykh dorog*. M.; Berlin: Direkt-Media, 2020.183 P.

21. Karabanov MA. Snizhenie vliyaniya sistemy tyagovogo `elektrosnabzheniya na `elektropitanie netyagovykh potrebitel'ey v momenty podklyucheniya preobrazovatel'nykh agregatov. *Izvestiya Transsiba*. 2011; 3 (7): 58-67.

22. Kulikova EA, Bebris AN. Innovacionnoe oborudovanie dlya povysheniya `energo`effektivnosti sistem `elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitel'ey. *Sovremennye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii*. Neftekamsk, 2017. pp.18-23.

23. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.396 P.

24. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Nguen Ty. Modelirovanie sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya, osnachennykh ustroystvami dlya umen'sheniya `elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye linii `elektroperedachi. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*. 2016; 9: 12-18.

25. Bochev AS, Finochenko TE. Modernizatsiya liniy prodol'nogo `elektrosnabzheniya dva provoda - rel'sy. *Vestnik RGUPS*. 2006; 4: 87-90.

26. Voropaj NI, Kolosok IN, Korkina ES. Problemy uyazvimosti i zhivuchesti kiberfizicheskikh `elektro`energeticheskikh sistem. *Energeticheskaya politika*. 2018; 5: 53-61.

27. Voropaj NI, Massel' LV, Kolosok IN. IT – infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nykh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem `energetiki na osnove cifrovyykh dvoynikov i cifrovyykh obrazov. *Izvestiya RAN. `Energetika*. 2021; 1:3-13.

28. Bulatov YuN, Kryukov AV. Algoritmy postroeniya cifrovogo dvojnika ustanovki raspredelennoy generacii. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020;13(6): 677-689.

Authors of the publication

Andrey V. Kryukov – Irkutsk National Research Technical University, Russia.

Irina A. Lyubchenko – Irkutsk State Transport University, Russia.

Получено

17.09.2021 г.

Отредактировано

29.09.2021 г.

Принято

12.10.2021 г.

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1
ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ»**

Масков Л.Р., Корнилов В.Ю.

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

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть структуру централизованной и автономной системы электроснабжения газового промысла (ГП) №1 ООО «Газпром добыча Ямбург». Выполнить расчет энергетических показателей (потребляемая активная, реактивная и полная мощность, коэффициенты мощности, коэффициенты реактивной мощности) для каждой секции шин (СШ) комплектно-трансформаторных подстанций (КТП) по ваттметрограммам, снятыми электромеханическими счетчиками на линейных ячейках закрытого распределительного устройства (ЗРУ) в течение календарного года. Рассчитать пиковый ток группы электроприемников (ЭП) для СШ каждой КТП. Разработать структурную динамическую схему централизованной и автономной системы электроснабжения. Определить основные элементы электротехнического комплекса (ЭТК) из разработанной структурной схемы, в которых происходят потери электрической мощности. Провести анализ особенностей функционирования и коэффициента загрузки автономной системы электроснабжения от дизельных электростанций (ДЭС) по схемам: «один генератор – обособленная группа электропотребителей» (ЭТК-1), единый центр генерации с каскадной (кольцевой) схемой включения (ЭТК-2). Сравнить годовой расход топлива ДЭС с ЭТК-2 и ЭТК-1 по месячным коэффициентам загрузки. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся приближенный метод определения энергетических показателей электрических нагрузок на каждой СШ КТП и коэффициентов загрузки дизельных электростанций по показаниям активной мощности (ваттметрограммам) за рассматриваемый период. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности построения и функционирования ЭТК газового промысла централизованной и автономной системы электроснабжения. Произведен приближенный расчет энергетических параметров для СШ КТП установки комплексной подготовки газа (УКПГ) и дожимной компрессорной станции (ДКС) по показаниям потребляемой активной мощности в течение рассматриваемого периода. В данной статье рассмотрены топливно-энергетические характеристики и особенности функционирования ДЭС. Рассчитаны месячные и годовые средневзвешенные коэффициенты загрузки и определены пиковые токи группы ЭП для каждой ДЭС. Произведен расчет годового расхода топлива ДЭС с ЭТК-1 и ЭТК-2 по месячным коэффициентам загрузки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В результате анализа структуры и энергетических характеристик выявлены особенности функционирования централизованной и автономной системы электроснабжения, которые определяют недостатки, требующие дальнейшего исследования и изучения, с последующей разработкой комплекса мероприятий по повышению энергоэффективности ЭТК.

Ключевые слова: *структурная динамическая схема ЭТК ГП; расчет электрических нагрузок по ваттметрограммам; выражения для определения потерь мощности в элементах ЭТК (ЭТК-1); центр генерации (ЭТК-2); средневзвешенный коэффициент загрузки для ДЭС; удельный расход топлива ДЭС.*

Для цитирования: Масков Л.Р., Корнилов В.Ю. Анализ структуры и энергетических параметров электротехнического комплекса газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 66-86. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.

**ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND ENERGY PARAMETERS OF THE
ELECTRICAL COMPLEX (EC) OF GAS COMPLEX №1
«GAZPROM DOBYCHA YAMBURG» LLC**

LR. Maskov, VYu. Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
Maskov.linar@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the structure of the centralized and autonomous power supply system for gas field (GF) №1 of «Gazprom dobycha Yamburg» LLC. Perform the calculation of the main energy indicators (consumed active, reactive and apparent power, power factors, reactive power factors) for each section of busbars (SB) of complete transformer substations (CTS) according to wattmetrograms taken by electromechanical meters on the linear cells of closed switchgear (CS) during a calendar year. Calculate the peak current of a group of electric receivers (ER) for each CS CTS. To analyze the features of the functioning and the load factor of the autonomous power supply system from diesel power plants (DPP) according to the schemes: “one generator - a separate group of electrical consumers” (EC-1) and a single generation center with a cascade (ring) switching circuit (EC-2). Compare the annual fuel consumption of diesel power plants with EC-1 and EC-2 by monthly load factors. *METHODS.* When solving the problem, an approximate method was used to determine the energy indicators of electrical loads at each CS CTS and the load factors of DPP according to the readings of active power (wattmetrograms) for the period under consideration. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, considers the features of the construction and functioning of the EC for a centralized and autonomous power supply system. An approximate calculation of the energy parameters at the each CTS SB of the integrated gas treatment plant (IGTP) and the booster compressor station (BCS) was made based on the readings of the active power consumed during the period under consideration. This article discusses the fuel and energy characteristics and features of the functioning of DPP. The monthly and annual weighted average load factors were calculated and the peak currents of the ER group were determined for each DPP. The calculation of the annual fuel consumption of DPP with EC-1 and EC-2 has been made according to monthly load factors. *CONCLUSION.* As a result of the analysis of the structure and energy characteristics, the features of the functioning of the centralized and autonomous power supply system were revealed, which determine the range of problems and shortcomings that require further research and study, with the subsequent development of a set of measures to improve the energy efficiency of the EC.

Keywords: *structural dynamic scheme of EC GF; calculation of electrical loads for wattmetrograms; expressions for determining the power losses in the elements of EC (EC-1); generation center (EC-2); weighted average load factor for diesel power plants (DPP); specific fuel consumption of DPP.*

For citation: Maskov LR, Kornilov VYu. Analysis of the structure and energy parameters of the electrical complex (EC) of gas complex №1 «Gazprom dobycha Yamburg» LLC. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6): 66-86. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.

Введение

Исследования в области повышения энергоэффективности ЭТК промышленных предприятий связаны с задачами по снижению удельных затрат электроэнергии на единицу добываемой продукции. Проблематике повышения энергоэффективности ЭТК посвящены работы отечественных [1-5] и зарубежных авторов [6-14]. Следует отметить, что эти задачи являются нетривиальными, многосвязными, требующими комплексного подхода к их изучению, что является актуальным научно-техническим направлением. Особенно остро задачи повышения энергоэффективности ЭТК ставятся перед объектами добычи, транспорта и переработки нефти и газа, где для питания потребителей электроэнергии нефтегазовых производств используются централизованные и автономные системы электроснабжения на базе ДЭС, газопоршневых или газотурбинных агрегатов. Автономные источники находят все большее применение в системах промышленного электроснабжения в качестве основных, резервных или аварийных

источников и, как правило, ограничены по мощности и перегрузочной способности, что делает такие системы чувствительными к току нагрузки, который не должен превышать максимальный ток генерации установки. Их функционирование имеет особенности, влияющие на работу ЭТК [15-18].

Снижение в автономных системах электроснабжения удельных затрат топлива на единицу добываемой продукции является важной научно-технической задачей. Интерес к данной тематике связан с ростом производственных мощностей, усложнением системы автоматизации и технологических процессов, повышенными требованиями к надежности и непрерывности технологических процессов промышленных предприятий. Анализ литературных источников [19-21] показывает, что методы исследования и повышения энергоэффективности ЭТК успешно применяются для объектов нефтедобычи и переработки. В то же время вопрос изучения и анализа ЭТК (ЭТК-1, ЭТК-2) газодобывающих предприятий проработан недостаточно. Целью данной статьи является анализ ЭТК с централизованной и автономной системой электроснабжения (ЭТК-1, ЭТК-2) ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» как объекта исследования.

Краткая характеристика объекта исследования

ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» входит в состав УКПГ сеноманской залежи Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ЯНГКМ) и расположен в юго-западной части Ямбургского месторождения на территории Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Основной деятельностью ГП является добыча, подготовка и транспортировка природного газа. Наиболее энергоемкими процессами при подготовке природного газа являются: двухступенчатое компримирование и охлаждение газа, регенерация абсорбента и метанола. По принятой технологической схеме, природный газ через систему коллекторов поступает на узел очистки газа (УОГ) и затем на дожимную компрессорную станцию (ДКС). На ДКС осуществляется очистка газа от механических примесей и капельной жидкости (в УОГ), компримирование и охлаждение скомпримированного газа. После ДКС газ с необходимым давлением поступает на установку комплексной подготовки газа (УКПГ), где осуществляется очистка газа от механических примесей и капельной жидкости, гликолевая осушка, охлаждение газа на аппаратах воздушного охлаждения (АВО), регенерация диэтиленгликоля и метанола с последующей транспортировкой подготовленного газа в магистраль.

Общая характеристика централизованной и автономной системы электроснабжения

Централизованное электроснабжение промыслов ЯНГКМ выполнено от электростанции собственных нужд (ЭСН) ГТЭС-72, расположенной на территории промбазы, и Северных электрических сетей ОАО «Тюменьэнерго» через подстанцию «Ямбург-110/10». Генерирующие мощности ЭСН работают параллельно с энергосистемой. Присоединение района Ямбурга к энергосистеме выполнено по двум ВЛ-220 кВ ПС «Оленья» - ПС «Ямбург 110/10», включенным на напряжение 110 кВ. Для распределения электроэнергии по месторождению используются ВЛ-110 кВ на одноцепных опорах и двухтрансформаторные ПС-110/35/6 кВ и ПС-110/6 кВ «глубокого ввода».

Централизованное электроснабжение ГП № 1 осуществляется по радиальной схеме (рис.1) от подстанции 35/6кВ с двумя трансформаторами мощностью по 25 МВА и двумя взаимно резервируемыми секциями шин ЗРУ 6 кВ. Для осуществления питания на площадках в центрах нагрузок установлены масляные двухтрансформаторные КТП 6/0,4 кВ (табл.1).

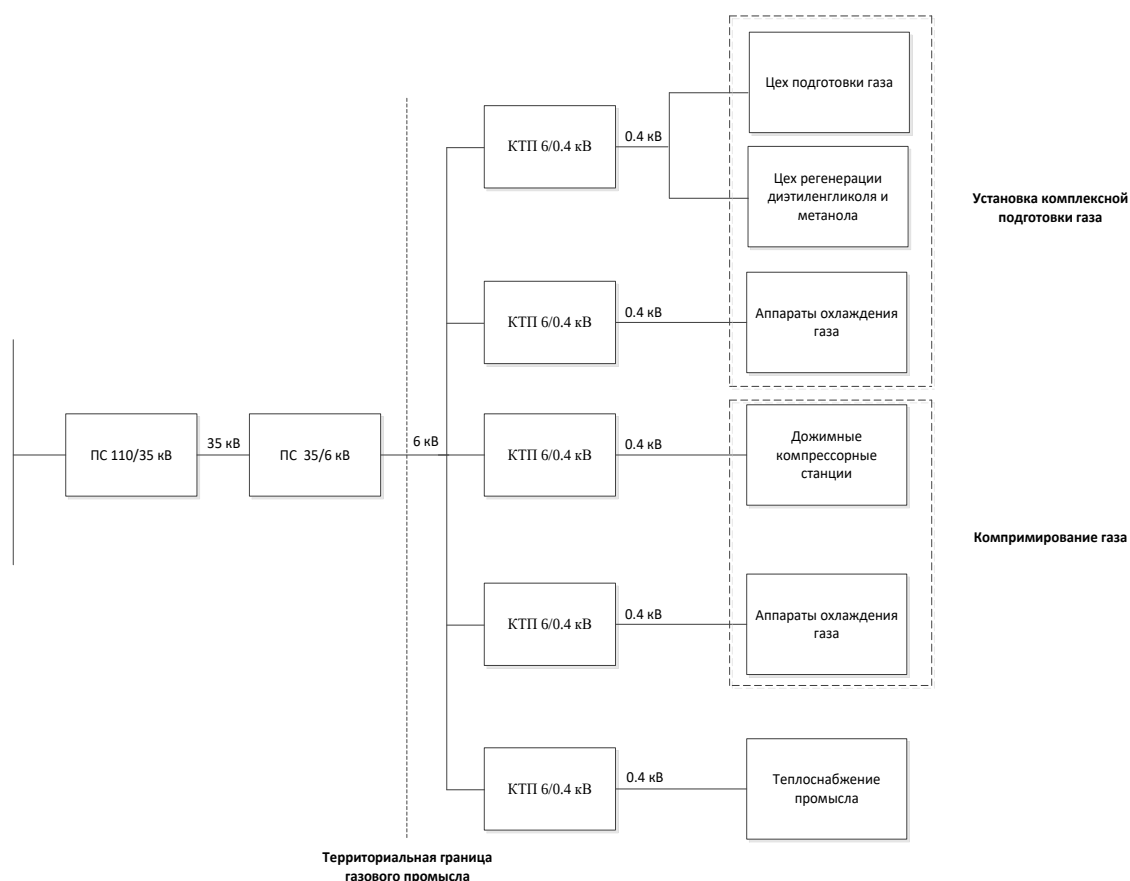


Рис.1. Структурная схема централизованного электроснабжения ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург»: ПС – подстанция; КТП – комплектно-трансформаторная подстанция

Fig.1. Block diagram of centralized power supply of GP No. 1 of Gazprom Dobycha Yamburg LLC: PS - substation; KTP - complete transformer substation

Таблица 1

Общие сведения о трансформаторах УКПГ и ДКС

№ КТП	Тип трансформатора, напряжение	Мощность, МВА	Кол-во
1	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2
2	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2
3	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2
4	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2
5	ТМЗ-1600/6/0,4 кВ	1,6	2
6	ТМЗ-1000/6/0,4 кВ	1	2
7	ТМЗ-1000/6/0,4 кВ	1	2
8	ТМЗ-1000/6/0,4 кВ	1	2

Основными электропотребителями на промысле являются тихоходные и средней быстроходности асинхронные электродвигатели технологических (табл.2), вентиляционных (табл.3) и сантехнических механизмов (табл.4) малой и средней мощности напряжением 380В, которые относятся к первой категории по ПУЭ в отношении надежности электроснабжения. Так же на промысле имеются потребители особой группы первой категории - это системы АСУ и КИП, аварийное электроосвещение и аварийная вентиляция. Для формирования бесперебойного питания потребителей особой группы напряжением ~380/220В и систем постоянного тока напряжением 110 и 220В применены агрегаты бесперебойного питания типа АБП-16 на площадках УКПГ и АБП-6,3 на площадках ДКС, имеющие в своем составе аккумуляторы и подзарядные выпрямители.

Таблица 2

Технические характеристики электродвигателей технологических насосов и электростартеров на газоперекачивающих агрегатах (ГПА)

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	100	0,9	87
2	55	0,9	90
3	45	0,87	92,5
4	30	0,88	90
5	22	0,86	87
6	15	0,84	89
7	11	0,85	88
8	7,5	0,91	87
9	4	0,88	87
10	3	0,81	82

Таблица 3

Технические характеристики электродвигателей вентиляционных установок

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	55	0,9	90
2	37	0,8	88
3	30	0,8	90
4	22	0,88	89
5	20	0,87	90
6	11	0,73	87
7	4	0,88	87
8	1,5	0,77	77
9	0,75	0,75	74

Таблица 4

Технические характеристики электродвигателей сетевых насосов воды

№	Номинальная мощность, кВт	$\cos \varphi$	КПД, %
1	160	0,78	87
2	90	0,88	90,5
3	30	0,88	89

Для осуществления минимизации потребления реактивной мощности на ГП используется нерегулируемая индивидуальная компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторных установок (КУ) (табл.5).

Таблица 5

Устройства компенсации реактивной мощности ГП

№ КТП	Мощность КУ, квар	Количество КУ	Тип КУ
1	-	-	-
2	36	48	КЭ2-0,38-36-3У3
3	-	-	-
4	-	-	-
5	36	26	КЭ2-0,38-36-3У3
6	36	26	КЭ2-0,38-36-3У3
7	36	20	КЭ2-0,38-36-3У3
8	36	20	КЭ2-0,38-36-3У3

Для распределения электрической энергии между КТП и потребителями используются кабельные линии (КЛ) следующих марок: АВВГ, АВБбШв, ВБбШв, ВВГ, КГ различного сечения и протяженности. КЛ располагаются открыто по эстакадам и

галереям внутри цехов, помещений и территории.

Жизнедеятельность при отключении централизованной системы электроснабжения потребителей обеспечивается: аварийными ДЭС, подключенными к СШ РУ-0,4 кВ КТП. На ГП №1 установлены четыре дизельные (рис.2) электростанции. Автоматическое включение ДЭС осуществляется при исчезновении напряжения от централизованной системы электроснабжения. Ручное включение ДЭС обеспечивает находящийся на смене оперативно-ремонтный персонал при кратковременных перерывах электроснабжения. В дежурном режиме находятся ДЭС №1, №2, №3. ДЭС № 4 через обходные кабельные линии резервирует по отдельности ДЭС №2 или ДЭС №3 в случае аварийного останова одной из этих дизельных электростанций. Резервирование КТП АВО газа УКПГ и ДКС с помощью ДЭС не предусмотрено.

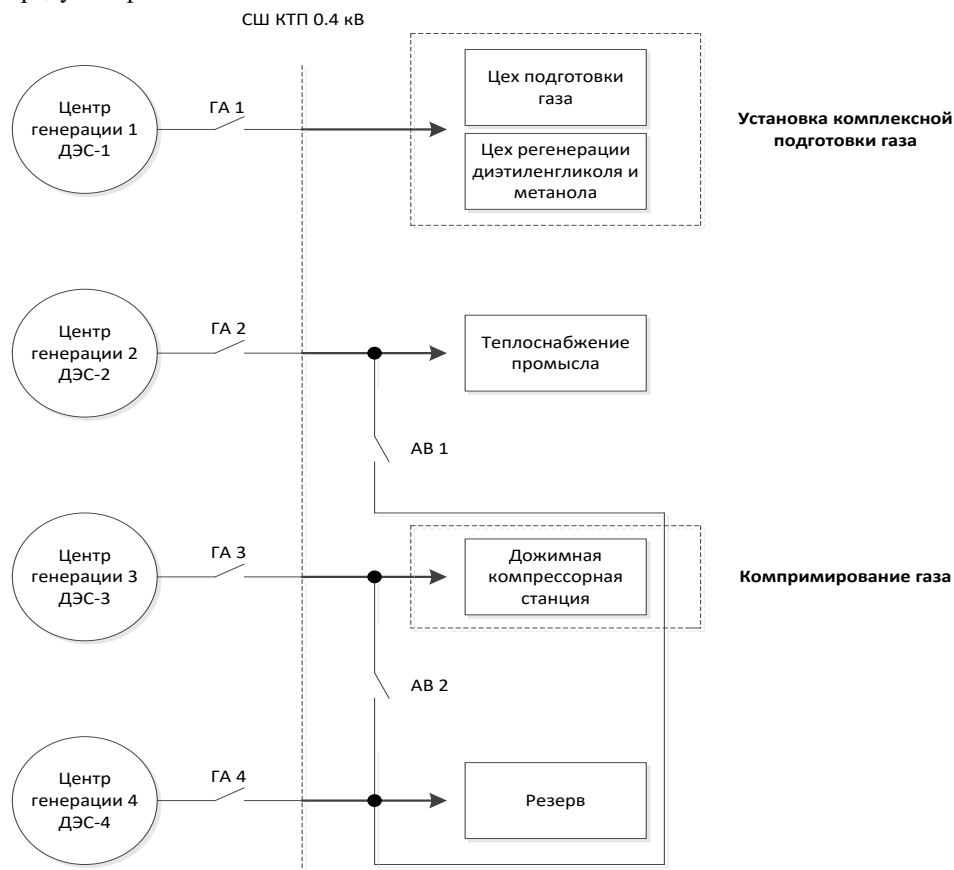


Рис.2. Структурная схема автономного электроснабжения: ГА – генераторный автомат; АВ – автоматический выключатель

Fig.2. Block diagram of autonomous power supply: GA - generator machine; AV - circuit breaker

Анализ энергетических характеристик централизованной и автономной системы электроснабжения

Учет электроэнергии на УКПГ и ДКС осуществляется в ЗРУ - 6 кВ (рис.3) по высокой стороне электромеханическими счетчиками на вводных (активная и реактивная мощность) и линейных ячейках (активная мощность).

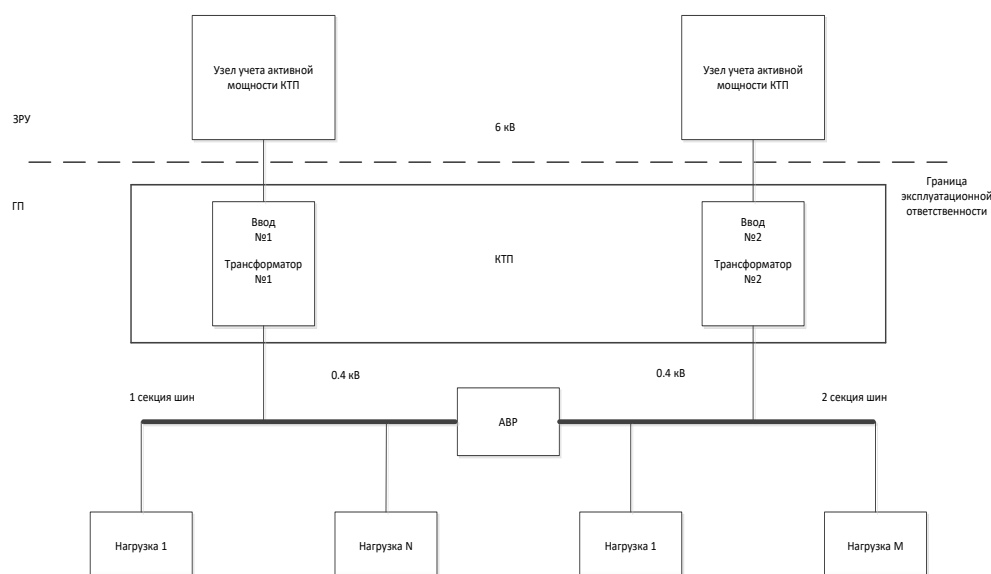


Рис. 3. Структурная схема электропитания от КТП 6/0,4 кВ: нагрузка 1...N – количество электроприемников на 1 секции шин; нагрузка 1...M – количество электроприемников на 2 секции шин

Fig. 3. Block diagram of power supply from KTP 6/0.4 kV: load 1...N – the number of electric receivers for 1 section of tires; load 1 ...M – the number of electric receivers for 2 sections of tires

Для оценки энергетических параметров системы электроснабжения и ЭТК необходимо определить показатели электрических нагрузок (потребляемая активная, реактивная и полная мощность, коэффициенты мощности, коэффициенты реактивной мощности). Изменение электрических нагрузок во времени обусловлено свойствами технологических процессов, в обеспечении которых участвует множество различных ЭП с различными режимами работы и графиками нагрузок. Для приближенного расчета электрических нагрузок в КТП ГП №1 используются следующие положения [22]:

1) нагрузка рассматриваемой группы ЭП на каждой секции шин КТП определяется согласно графикам потребляемой активной электрической мощности (т.к. отсутствует информация о реактивной мощности на каждом присоединении), снятыми электромеханическими счетчиками на линейных ячейках ЗРУ (рис.4);

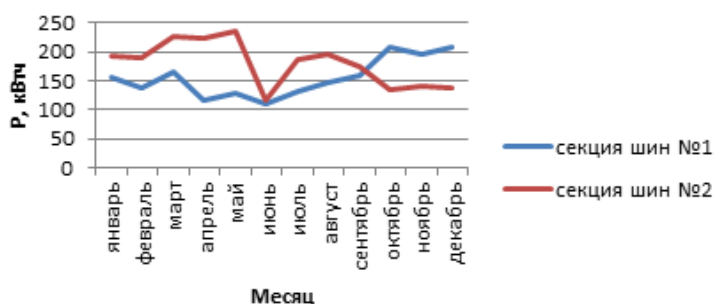


Рис.4. Годовой график потребления активной мощности КТП №1

Fig.4. Annual schedule of active power consumption of KTP No. 1

2) определяется среднеквадратичная активная нагрузка группы ЭП на каждой секциях шин КТП:

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_{12}^2 \cdot t_{12}}{t_1 + t_2 + \dots + t_{12}}}, \quad (1)$$

где $P_1 \dots P_{12}$ – нагрузки за месяц; $t_1 \dots t_{12}$ – количество часов в месяце при непрерывном режиме работы газового промысла.

Нагрузка за месяц определяется:

$$P_1 \dots P_{12} = \sum_{i=1}^N P_{\text{ном}i} + \sum_{j=1}^M (P_{\text{нв}} \cdot \sqrt{ПВ})_j, \quad (2)$$

где $P_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность ЭП для продолжительного режима работы; $ПВ$ – продолжительность включения в о. е., $P_{\text{нв}}$ – мощность ЭП работающего в повторно-кратковременном режиме; N – количество ЭП работающих в продолжительном режиме; M – количество ЭП работающих в повторно-кратковременном режиме (табл.6);

Таблица 6

Количество ЭП для продолжительного и повторно-кратковременного режима		
№ КТП/№ секции шин	N	M
1/1	59	2
1/2	56	2
2/1	24	0
2/2	24	0
3/1	21	3
3/2	23	3
4/1	126	14
4/2	160	14
5/1	13	0
5/2	13	0
6/1	13	0
6/2	13	0
7/1	10	0
7/2	10	0
8/1	10	0
8/2	10	0

- 1) определяется средневзвешенный коэффициент мощности и $\tan \varphi_{\text{с.вз}}$ группы ЭП:

$$\cos \varphi_{\text{с.вз.}} = \frac{\sum_{n=1}^S P_{\text{ном}n} \cdot \cos \varphi_n}{\sum_{n=1}^S P_{\text{ном}n}}, \quad (3)$$

где $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности каждого ЭП на секции шин; S – общее кол-во ЭП на С.Ш. (табл.7);

$$\tan \varphi_{\text{с.вз.}} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{с.вз.}}}}{\cos \varphi_{\text{с.вз.}}}, \quad (4)$$

- 2) определяется коэффициент максимума:

$$k_m = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{cp}}}, \quad (5)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка, которая находится по годовому графику изменения активной мощности КТП (рис.4);

- 3) определяются из (1), (4-5), расчетные величины активной, реактивной и полной мощности группы ЭП на каждой секции шин КТП:

$$P_p = k_m \cdot P_{\text{cp}} = P_{\text{max}}, \quad (6)$$

$$Q_p = P_p \cdot \tan \varphi_{\text{с.вз.}} - Q_{\kappa}, \quad (7)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (8)$$

где Q_{κ} – реактивная мощность компенсации на каждой секции шин (из табл.5);

- 4) определяются расчетный коэффициент мощности и коэффициент реактивной мощности для группы ЭП КТП из (6-8):

$$\cos \varphi_p = \frac{P_p}{S_p}, \quad (9)$$

$$\tan \varphi_p = \frac{Q_p}{P_p} . \quad (10)$$

Расчет производится аналогично для КТП (№2-8). Результаты из (1), (3-10) вносятся в табл.7.

Таблица 7

Энергетические показатели централизованной системы электроснабжения

№ КТП/№ секции шин	Общее кол-во ЭП, шт	Среднемесячная активная нагрузка, кВт	Средневзвешенный коэффициент мощности	Средневзвешенный коэффициент реактивной мощности	Коэффициент максимума	Активная расчетная мощность, кВт	Реактивная расчетная мощность, кВар	Полная расчетная мощность, кВА	Коэффициент расчетной мощности на секции шин КТП	Коэффициент расчетной реактивной мощности на секции шин КТП
	S	P _{ср}	cos φ _{с.вз}	tan φ _{с.вз}	k _m	P _p	Q _p	S _p	cos φ _p	tan φ _p
1/1	61	158,5	0,85	0,62	1,31	208	1,28	244,73	0,849	0,62
1/2	58	183,3	0,88	0,54	1,29	237	127,98	269,34	0,879	0,54
2/1	24	158,8	0,8	0,75	1,78	282	5,72	282,06	0,99	0,02
2/2	24	198,9	0,8	0,75	1,83	364	7,38	364,07	0,99	0,02
3/1	24	107,7	0,79	0,78	1,24	134	104,52	169,94	0,788	0,78
3/2	26	143,3	0,77	0,83	1,19	171	141,93	222,23	0,769	0,83
4/1	140	127,2	0,79	0,78	1,29	165	128,7	209,26	0,788	0,78
4/2	174	121,3	0,81	0,72	1,32	160	115,2	197,16	0,811	0,72
5/1	13	97,2	0,82	0,7	2,05	199	3,76	199,04	0,99	0,019
5/2	13	60,6	0,82	0,7	1,65	100	1,89	100,02	0,99	0,019
6/1	13	97,4	0,8	0,75	1,95	190	3,85	190,04	0,99	0,02
6/2	13	60,5	0,8	0,75	1,98	120	2,43	120,02	0,99	0,02
7/1	10	64,4	0,82	0,7	2,06	133	2,52	133,02	0,99	0,019
7/2	10	50,4	0,82	0,7	1,77	89	1,68	89,02	0,99	0,019
8/1	10	64,4	0,8	0,75	2,17	140	2,84	140,03	0,99	0,02
8/2	10	50,3	0,8	0,75	1,89	95	1,93	95,02	0,99	0,02

Для определения максимальной нагрузки одного или группы ЭП необходимо найти пиковый ток (табл.8). Для одиночного электродвигателя пиковый ток будет являться пусковым током. Пиковый ток для групповой нагрузки определяется [23]:

$$I_{\text{пик}} = I_{n.\text{max}} + (I_p - k_u \cdot I_{\text{ном.макс}}) , \quad (11)$$

где $I_{n.\text{max}}$ – пусковой ток электродвигателя наибольшей мощности, k_u – коэффициент использования, характерный для электродвигателя с наибольшим номинальным током [24], $I_{\text{ном.макс}}$ – номинальный ток электродвигателя с наибольшим пусковым током, I_p – расчетный ток нагрузки группы ЭП, который определяется:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} , \quad (12)$$

где S_p – сумма полных мощностей на двух секциях КТП из (8), U_n – номинальное напряжение на вторичной обмотки трансформатора в КТП.

Используя паспортные характеристики ДЭС (Cummins C900D5, КАС-630, БЭС-630), сравним ток генерации ДЭС с пиковым током для групповой нагрузки (из табл.8). Анализ показал превышение пикового тока над максимальной силой тока генерации ДЭС примерно на 15...20 % (табл.9).

Таблица 8

Пиковая нагрузка, создаваемой группой ЭП на двух секциях КТП

№ КТП	S_p , кВА	I_p , А	$k_{\text{и}}$	$I_{\text{ном.мах}}$, А	$I_{\text{п.мах}}$, А	$I_{\text{пик}}$, А
1	514,08	742,01	0,1	180	800	1524,01
2	646,13	932,61	0,8	100	400	1252,61
3	392,17	566,05	0,7	190	950	1383,05
4	406,41	586,6	0,1	175	875	1444,11
5	299,05	431,65	0,8	100	400	751,65
6	310,66	447,54	0,8	100	400	767,54
7	222,04	320,49	0,8	100	400	640,49
8	235,05	339,26	0,8	100	400	659,26

Таблица 9

Пиковая нагрузка, создаваемой группой ЭП на двух секциях КТП

Тип станции	Номинальный ток в основном режиме, А	Максимальная сила тока, А	$I_{\text{пик}}$, А
Cummins C900D5	1037	1296	1524,01
Разница с $I_{\text{пик}}$, %	-31,96	-14,96	
КАС-630	1010	1154	1383,05
Разница с $I_{\text{пик}}$, %	-26,97	-16,56	
БЭС-630	1015	1162	1444,11
Разница с $I_{\text{пик}}$, %	-29,71	-19,54	

Централизованная система электроснабжения организована по схеме: «КТП-1 – УКПГ», «КТП-3 – узел подключения теплоносителя (УПТ)», «КТП-4 – ДКС», «КТП-2,5,6,7,8 – аппараты воздушного охлаждения газа» (рис.5).

Полная активная мощность каждого КТП состоит из полезной мощности, расходуемой на добычу, подготовку, сжатие, охлаждения природного газа и циркуляцию воды в системе теплоснабжения промысла, и потерь мощности в элементах каждого ЭТК:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{полезн}} + \Delta P_{\text{кТП}}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{\text{кТП}}$ – потери мощности в элементах ЭТК КТП.

Потери мощности в каждом ЭТК определяются выражениями в соответствии с рис.5:

$$\Delta P_{\text{кТП1}} = \Delta P_{\text{кл.до.тр-ра}} + \Delta P_{\text{тр-р}} + \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}} + \Delta P_{\text{абп}} + \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{пч}}, \quad (14)$$

$$\Delta P_{\text{кТП3}} = \Delta P_{\text{кл.до.тр-ра}} + \Delta P_{\text{тр-р}} + \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}}, \quad (15)$$

$$\Delta P_{\text{кТП3}} = \Delta P_{\text{кл.до.тр-ра}} + \Delta P_{\text{тр-р}} + \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{в}}, \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{кТП4}} = \Delta P_{\text{кл.до.тр-ра}} + \Delta P_{\text{тр-р}} + \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{ибп}} + \Delta P_{\text{спт}} + \Delta P_{\text{эст}} + \Delta P_{\text{пч}} \quad (17)$$

где $\Delta P_{\text{кл.до.тр-ра}}$ – потери активной мощности в КЛ до трансформатора, $\Delta P_{\text{тр-ра}}$ – потери активной мощности трансформатора, $\Delta P_{\text{кл.н}}$ – потери активной мощности в КЛ нагрузки, $\Delta P_{\text{эл}}$ – потери активной мощности в электродвигателе, $\Delta P_{\text{н}}$ – потери в насосе, $\Delta P_{\text{в}}$ – потери в вентиляторе, $\Delta P_{\text{лн}}$ – потери активной мощности в линейной нагрузке, $\Delta P_{\text{абп}}$ – потери активной мощности в АБП, $\Delta P_{\text{к}}$ – потери активной мощности в компрессоре, $\Delta P_{\text{пч}}$ – потери активной мощности в ПЧ, $\Delta P_{\text{ибп}}$ – потери активной мощности в ИБП, $\Delta P_{\text{спт}}$ – потери активной мощности в СПТ, $\Delta P_{\text{эст}}$ – потери активной мощности в электростартере.

Автономная система электроснабжения организована по схеме: «один генератор – УКПГ», «один генератор – узел подключения теплоносителя (УПТ)», «один генератор – ДКС», «один генератор – резерв», где нагрузка на электростанцию осуществляется через резервирование СШ включением АВР в КТП (рис.6).

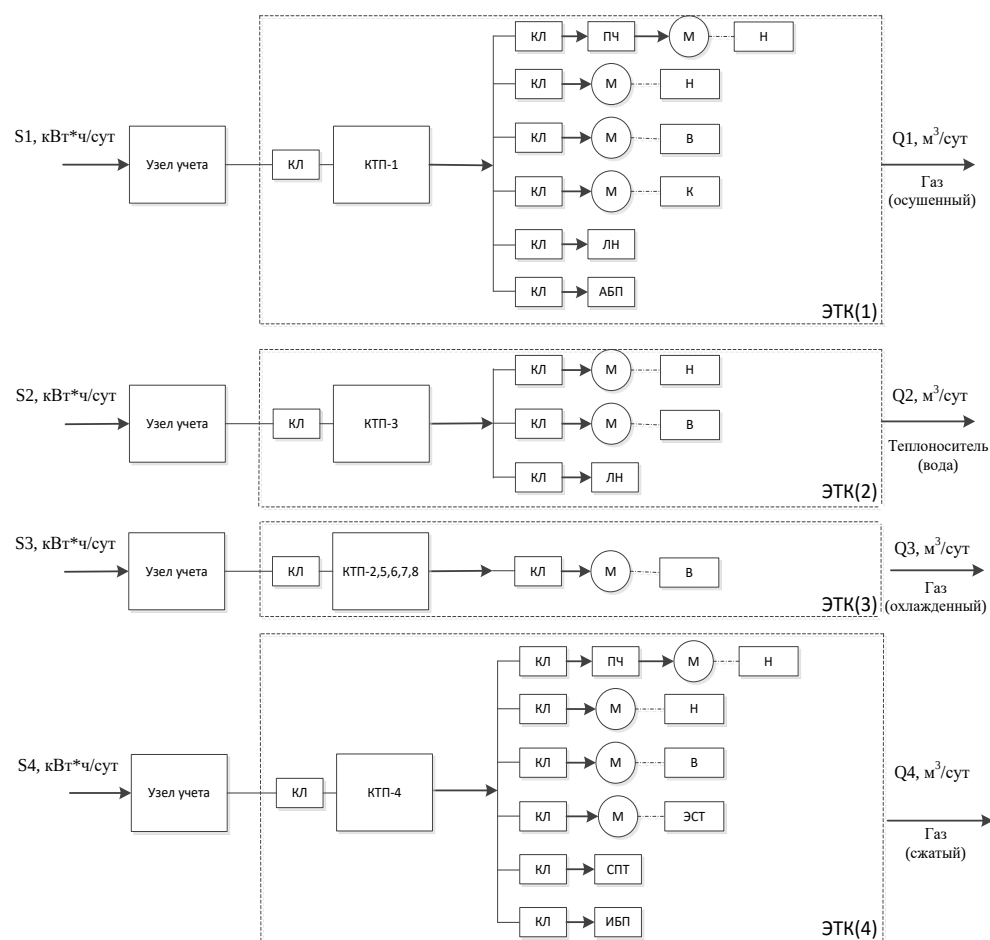


Рис.5. Структурная динамическая схема электротехнического комплекса газового промысла с централизованной системой электроснабжения: КЛ – кабельная линия; ПЧ – преобразователь частоты; М – электродвигатель; Н – насос; В – вентилятор; К – компрессор; ЛН – линейная нагрузка; АБП – агрегат бесперебойного питания; ЭСТ – электростартер; СПТ – система постоянного тока; ИБП – источник бесперебойного питания; S_1 - S_4 – суточный расход электрической энергии; Q_1 , Q_3 , Q_4 – суточный объем газа; Q_2 – суточный объем воды

Fig.5. Structural dynamic scheme of the electrotechnical complex of the gas field with a centralized power supply system: KL - cable line; IF - frequency converter; M - electric motor; H - pump; B - fan; K - compressor; LN - linear load; ABP - uninterruptible power supply unit; ECT - electric starter; SPT - DC system; UPS - uninterruptible power supply; S_1 - S_4 - daily consumption of electrical energy; Q_1 , Q_3 , Q_4 - daily volume of gas; Q_2 - daily volume of water

Автономная система электроснабжения организована по схеме: « один генератор – УКПГ», « один генератор – узел подключения теплоносителя (УПТ)», « один генератор – ДКС», « один генератор – резерв», где нагрузка на электростанцию осуществляется через резервирование СШ включением АВР в КТП (рис.6).

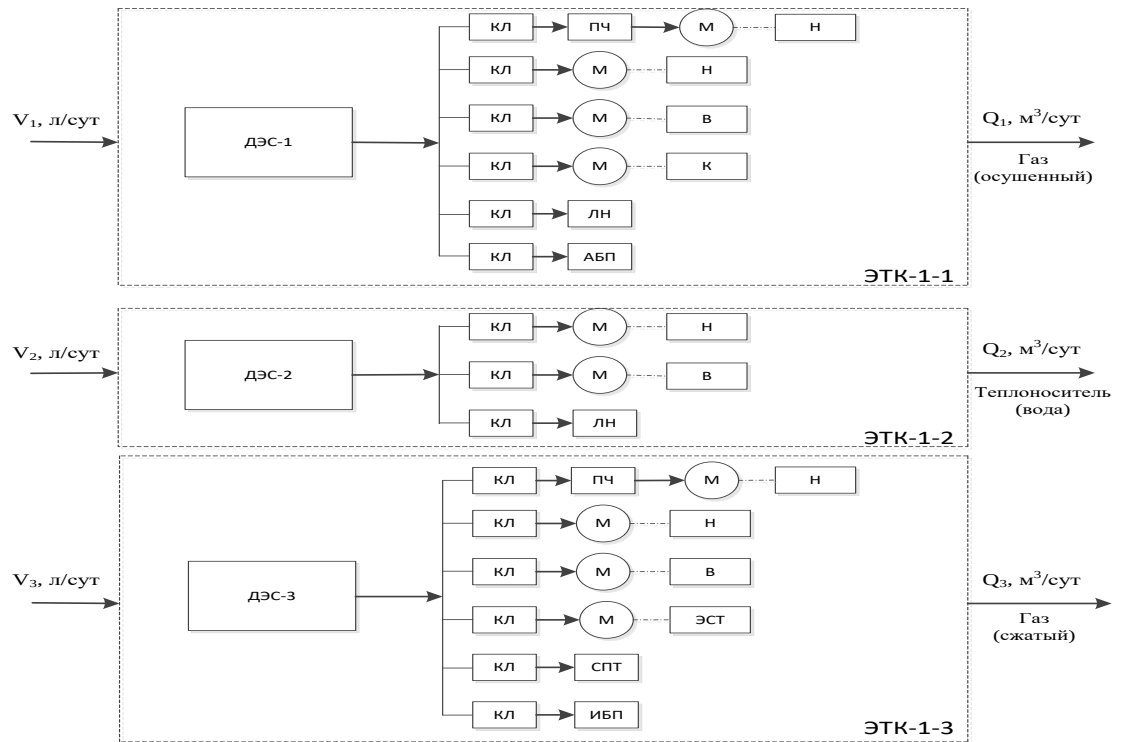


Рис.6. Структурная динамическая схема электротехнического комплекса газового промысла с автономной системой электроснабжения: V_1 - V_3 – суточный расход дизельного топлива; Q_1 - Q_3 – суточный объем газа; Q_2 – суточный объем воды; ДЭС-1,2,3 – дизель-генераторные электростанции

Fig.6. Structural dynamic diagram of the electrical complex of the gas field with an autonomous power supply system: V_1 - V_3 – daily consumption of diesel fuel; Q_1 - Q_3 – daily volume of gas; Q_2 – daily volume of water; DES-1,2,3 – diesel generator power plants

По аналогии с [25] обозначим ЭТК, где основное электрооборудование получает питание от одного ДЭС, как ЭТК-1. К каждой ДЭС подключается группа ЭП, которая создает мгновенные изменения напряжения, тока и частоты, которые отрицательно влияют на: перегрузочную способность, обеспечение необходимых показателей качества электрической энергии в зависимости от класса нагрузки каждой электростанции (стандарт ИСО 8528-5 класс G2). Величина изменений, возникающая при набросе и сбросе нагрузки, зависит от различных факторов: характера нагрузки, режима работы технологического оборудования, технических характеристик ДЭС, условий эксплуатационных ограничений электростанций (ИСО 3046-1, ИСО 8528-1). Основная часть нагрузки ГП №1 это нерегулируемые АД, которые создают 5-8 кратные пусковые токи. Как правило, ДЭС ограничены по мощности и перегрузочной способности, что делает такие системы чувствительными к току нагрузки и пиковому току нагрузки (табл.9), который не должен превышать максимальный ток генерации ДЭС.

Потери активной мощности в каждом ЭТК-1 определяются выражениями в соответствии с (рис.6):

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}} + \Delta P_{\text{абп}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{пч}}, \quad (18)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{лн}}, \quad (19)$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{\text{кл.н}} + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{ибп}} + \Delta P_{\text{спт}} + \Delta P_{\text{эст}} + \Delta P_{\text{пч}}. \quad (20)$$

Расход топлива ДЭС зависит от коэффициента загрузки и частоты вращения его вала. Рассчитаем месячный коэффициент загрузки (рис.7) ДЭС №1, №2, №3 в соответствии с показаниями ежемесячного потребления электроэнергии КТП (табл.10), снятыми электромеханическими счетчиками электрической энергии в узлах учета ЗРУ в период с января по декабрь 2019 года. Расчет проведем для стационарных условий эксплуатации ДЭС (температура 25°C, давление 0,1Мпа; относительная влажность 30%), соответствующей номинальной мощности электростанции в соответствии с ИСО 3046-1.

Таблица 10

Показания ежемесячного потребления электроэнергии КТП за 2019 год, кВт·ч

№ КТП	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
1	348	328	393	339	366	226	318	343	331	343	337	359
3	292	270	291	271	269	227	85	98	231	269	285	314
4	307	290	278	249	230	150	169	174	212	242	293	335

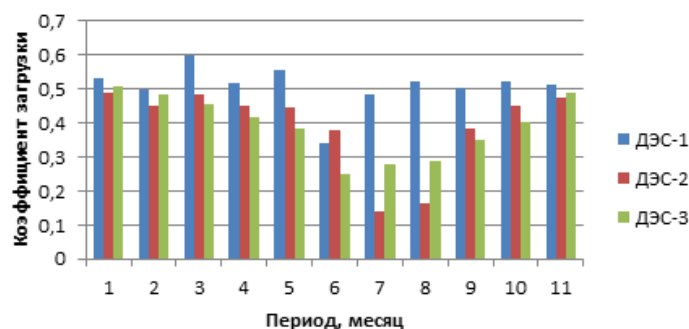


Рис.7. Гистограмма месячных коэффициентов загрузки ДЭС за 2019 год

Fig.7. Histogram of monthly load coefficients of DES for 2019

Анализ литературы [26] показывает, что если коэффициент загрузки для ДЭС лежит ниже 0,4, то наблюдается работа с повышенным удельным расходом топлива и проявляется эффект карбонизации (коксования), вызванной скоплением в цилиндрах продуктов неполного сгорания топлива, что ведет к снижению ресурса двигателя. Коэффициент загрузки для ДЭС, обеспечивающий оптимальное потребление дизельного топлива, должен стремиться к 0,75. Загрузка ДЭС более чем на 0,75 ведет к снижению коэффициента полезного действия и перерасходу топлива. Месячные коэффициенты загрузки ДЭС ГП находятся в пределах от 0,13 до 0,6, а годовые средневзвешенные коэффициенты загрузки лежат ниже 0,75 (ДЭС-1 – 0,51; ДЭС-2 – 0,38; ДЭС-3 – 0,39), что говорит об избыточной установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу выпускаемой продукции. Уменьшение удельного расхода дизельного топлива можно достичь с помощью объединения ДЭС в единый центр генерации с каскадной (кольцевой) схемой включения (ЭТК-2) (рис.8). Каскадная схема включения позволит включать (отключать) ДЭС согласно граничным значениям потребляемой мощности, что позволит увеличить коэффициент загрузки и продлить ресурс дизельных двигателей.

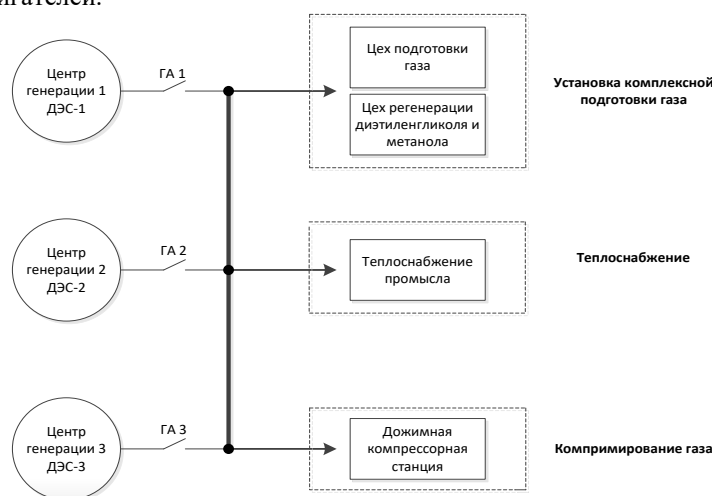


Рис.8. Структурная схема каскадного включения ДЭС: ГА – генераторный автомат

Fig.8. Block diagram of cascade switching of DES: GA - generator automaton

Определим граничные значения потребляемой мощности, при достижении которых подключается либо отключается очередной дизель-генератор:

1) определяется оптимальная мощность ДЭС при коэффициенте загрузки равной 0,75 (примем номинальные мощности ДЭС-1 и ДЭС-2 (ДЭС-3) равными):

$$P_{\text{опт}} = P_{\text{ном}} \cdot 0,75 = 630 \cdot 0,75 = 472,5 \text{ кВт}, \quad (21)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ДЭС;

2) из показаний ежемесячного потребления электроэнергии КТП за 2019 год (табл. 10) определяется суммарная потребляемая мощность КТП №1, №3, №4 за каждый месяц – $\sum P_{\text{кп}}$;

3) определяется количество ДЭС, которые смогут обеспечить требуемую потребность мощности:

$$x \cdot P_{\text{опт}} \geq \sum P_{\text{кп}}, \quad (22)$$

где x – количество ДЭС с каскадной схемой включения;

4) определяется потребляемая мощность каждой ДЭС с каскадной схемой включения – $P_{\text{потр}}$

$$P_{\text{потр}} = \frac{\sum P_{\text{кп}}}{x} \quad (23)$$

5) Полученные значения из (21-23) вносятся в таблицу 11.

Таблица 11

Ежемесячные показатели потребления мощности КТП и ДЭС при каскадной схеме включения

Месяц	$\sum P_{\text{кп}}$, кВт·ч	$P_{\text{потр}}$, кВт·ч	x
январь	947	315,67	3
февраль	888	444	2
март	962	320,67	3
апрель	859	429,5	2
Май	865	432,5	2
июнь	603	301,5	2
июль	572	286	2
август	615	307,5	2
сентябрь	774	387	2
октябрь	854	427	2
ноябрь	915	457,5	2
декабрь	1008	336	3

В соответствии с потребленной мощностью каждой ДЭС с каскадной схемой включения (ЭТК-2) (табл.11) рассчитаем ежемесячный коэффициент загрузки и сравним средневзвешенный коэффициент загрузки ($K_{\text{год.ср.взв.}}$) ЭТК-2 с ЭТК-1 (табл.12).

Таблица 12

Показания ежемесячного и годового средневзвешенного коэффициента загрузки

№ ДЭС	№ ЭТК	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	$K_{\text{год.ср.взв.}}$
1	1	0,53	0,5	0,6	0,52	0,56	0,34	0,49	0,52	0,5	0,52	0,51	0,55	0,51
	2	0,5	0,7	0,51	0,68	0,69	0,48	0,45	0,49	0,61	0,68	0,73	0,53	0,59
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														13,56
2	1	0,46	0,43	0,46	0,43	0,43	0,36	0,13	0,16	0,37	0,43	0,45	0,5	0,38
	2	0,5	0,7	0,51	0,68	0,69	0,48	0,45	0,49	0,61	0,68	0,73	0,53	0,59
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														35,59
3	1	0,49	0,46	0,44	0,4	0,37	0,24	0,27	0,28	0,34	0,38	0,47	0,53	0,39
	2	0,5	-	0,51	-	-	-	-	-	-	-	-	0,53	0,51
Разница между ЭТК-2 и ЭТК-1, %														23,53

Автономная система электроснабжения ГП состоит из ДЭС блочного типа исполнения с различными эксплуатационными и техническими характеристиками, приведенными в таблице 13.

Таблица 13

Топливо-энергетические характеристики ДЭС

Тип станции	Мощность, кВт	Удельный расход топлива по ИСО 3046/1-99, г/кВт*час	Удельный расход масла, г/кВт*час	Нагрузка (70-75 %), кВт	Усредненный расход топлива, л/час	Усредненный расход масла, кг/час
БЭС-630	630	207 ⁺¹²	не более – 5,9	350-450	130	2,5
КАС-630	630	227 ⁺¹⁰	не более – 2,9	350-450	133	1,0 – 1,3
Cummins C900D5	656	215 ⁺¹⁰	не более – 1,9	350-450	126	0,5

Зависимость удельного расхода топлива от нагрузки является нелинейной функцией, а обеспечение минимального расхода топлива ДЭС – задача нелинейной оптимизации. Воспользуемся формулой (24), в которой приведена универсальная зависимость удельного расхода топлива ДЭС от коэффициента загрузки [27]:

$$g = g_{\text{ном}} (0,0811 \cdot k_z^{-1,385} + 0,912), \quad (24)$$

где $g_{\text{ном}}$ – удельный расход топлива при номинальной нагрузке (табл.13), k_z – коэффициент загрузки ДЭС.

Построим графики зависимостей удельного расхода топлива от коэффициента загрузки для ДЭС (Cummins C900D5, БЭС – 630, КАС – 630) (рис.9) и сравним годовые расходы топлива ЭТК-2 с ЭТК-1 (табл.14) по месячным коэффициентам загрузки (из табл.12).

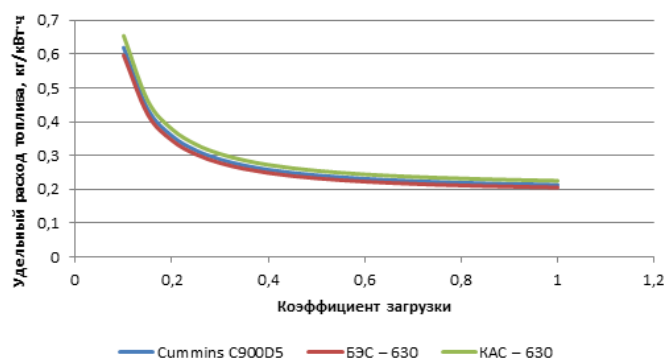


Рис.9. График зависимости удельного расхода топлива от коэффициента загрузки для ДЭС (Cummins C900D5, БЭС – 630, КАС – 630)

Fig.9. Graph of the dependence of specific fuel consumption on the load factor for DES (Cummins C900D5, BES - 630, CAS - 630)

Таблица 14

Показания ежемесячного и годового расхода дизельного топлива для ЭТК-1 и ЭТК-2, кг

№ ЭТК	1	1	1	2	Разница расхода топлива между ЭТК-2 и ЭТК-1, %
январь	82,04	69,35	78,85	229,75	
февраль	78,44	65,63	75,67	195,55	
март	90,23	69,18	73,44	232,45	
апрель	80,42	65,8	68,13	190,29	
май	85,3	65,46	64,71	191,37	
июнь	60,62	58,52	51,2	144,67	
июль	76,65	38,92	54,24	139,29	
август	81,14	40,15	55,06	146,76	
сентябрь	78,98	59,17	61,53	174,95	
октябрь	81,14	65,46	66,86	189,38	
ноябрь	80,06	68,16	76,23	200,46	
декабрь	84,03	73,1	84,14	240,74	
всего	2508,03			2275,66	9,265

Разница годового расхода топлива между ЭТК-2 и ЭТК-1 составила 9,265 %, что говорит о том, что модернизация автономной системы электроснабжения ГП №1 позволит получить экономический эффект, за счет увеличения коэффициента загрузки ДЭС.

Выводы

1. ЭТК ГП-1 является сложной технической системой с изменяемой структурой в зависимости от вида системы электроснабжения, а именно: ЭТК с централизованной системой электроснабжения, либо ЭТК в виде совокупности трех подсистем с автономными системами электроснабжения, функционирующие по схеме: «один генератор – отдельная группа электроприемников» (ЭТК-1).

2. Анализ индивидуальных и средневзвешенных коэффициентов мощности потребителей выявил отсутствие управляемой системы компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник, что указывает на наличие резервных возможностей повышения энергоэффективности [28-33] ЭТК ГП-1.

3. Присутствие мощных электродвигателей с прямой системой пуска создает пиковые токи (табл.8), превышающие максимальный ток генерации единичной ДЭС (табл.9), следовательно, необходимо оценить целесообразность использования систем плавного пуска и (или) преобразователей частоты.

4. Годовые средневзвешенные коэффициенты загрузки ДЭС не превышают 51 % (по данным за 2019 год), что говорит об избыточной установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу выпускаемой продукции.

5. Анализ публикаций [34-37] показывает, что перспективным направлением повышения энергоэффективности ЭТК автономной системы электроснабжения являются: создание центра генерации электрической энергии (ЭТК-2) за счет объединения отдельных ДЭС в единый энергетический комплекс и модернизация кабельной сети под задачу распределения электроэнергии между независимыми группами электроприемников.

6. Для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности ЭТК ГП №1 необходимо исследовать потери электроэнергии в элементах ЭТК (ЭТК-1), разработать модель схемы замещения ЭТК (ЭТК-1), сравнить энергетические характеристики ЭТК-1 и единого центра генерации с каскадной схемой включения (ЭТК-2) с помощью средств компьютерного моделирования. Разработать алгоритм функционирования каскадной схемы подключения (отключения) ДЭС при работе на сеть с переменной нагрузкой. Разработать методику модернизации кабельной сети для обеспечения электроэнергией обособленные группы электропотребителей. Разработать методику коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник для централизованной и автономной системы электроснабжения ЭТК в условиях переменной нагрузки.

Результаты

1. Анализ структуры ЭТК ГП-1 показал, что централизованная и автономная система электроснабжения отличаются друг от друга за счет отключения ряда потребителей и питающих линий.

2. Проведена оценка энергетических параметров для централизованной системы электроснабжения и ЭТК через приближенные оценки коэффициентов расчетной (0,769...0,99) и реактивной мощности (0,019...0,83) на СШ КТП, который выявил отсутствие управляемой системы компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник.

3. Разработаны структурные динамические схемы электротехнического комплекса газового промысла централизованной и автономной системы электроснабжения от дизель-генераторных электростанций, с помощью которых получены выражения для расчета суммарных потерь электрической энергии.

4. Проведен анализ коэффициента загрузки дизельных электростанций (ЭТК-1) за период с января по декабрь 2019 года, который показал, что месячные коэффициенты загрузки находятся в интервале от 0,13 до 0,6; годовой средневзвешенный коэффициент загрузки по отдельным генераторам: ДЭС-1 – 0,51; ДЭС-2 – 0,38; ДЭС-3 – 0,39, что говорит об избыточной установленной мощности ДЭС, и, как следствие, о ненормированном перерасходе дизельного топлива на единицу выпускаемой продукции.

5. Была предложена система автономного электроснабжения с объединением ДЭС в единый центр генерации с каскадной (кольцевой) схемой включения (ЭТК-2) (рис.8). Определены граничные значения потребляемой мощности, при достижении которых подключается либо отключается очередной дизель-генератор (табл.11). Рассчитаны месячные и годовые средневзвешенные коэффициенты загрузки для ЭТК-2, которые

показали увеличение годовых средневзвешенных коэффициентов загрузки (ДЭС-1 – 13,56 %, ДЭС-2 – 35,59 %, ДЭС-3 – 23,53 %) по сравнению с ЭТК-1.

6. Проведено сравнение годового расхода топлива ДЭС по месячным коэффициентам загрузки (табл.14), которое показало уменьшение годового потребления топлива с ЭТК-2 на 9,265 % по сравнению с ЭТК-1.

7. Данные, полученные в ходе этого анализа, требуют дальнейшего исследования и изучения, с последующей разработкой комплекса мероприятий по повышению энергоэффективности ЭТК ГП-1.

Литература

1. Меньшов Б.Г., Суд И.И. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 1984. 416 с.
2. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра, 2000. 72с.
3. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 339-347.
4. Ершов М.С., Конкин Р.Н. Определение параметров источников питания электротехнических комплексов с электродвигательной нагрузкой. В сборнике: Культура, наука, образование: проблемы и перспективы. Материалы VI международной научно-практической конференции. 2017. С. 130-133.
5. Козярук А.Е. Энергоэффективные электротехнические комплексы горнодобывающих и транспортных машин. Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 261-269.
6. Ortega A., Milano F. Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. V. 31, no. 5. pp. 3369–3380.
7. Jain A., Biyik E., Chakraborty A. A model predictive control design for selective modal damping in power systems in Proc. of American Control Conference, 2015, pp. 4314–4319.
8. Xiaodong Liang. Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system. 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016.
9. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017.
10. Lucio Steckling, Marcelo Lobo Heldwein. Model-Based Synchronous Optimal Modulation for Three-Level Inverters Applied to Electrical Submersible Pumps Systems. PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Publisher: VDE. Date of Conference: 7-9 May 2019.
11. Xiaodong Liang, Ahmad El-Kadri. Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018.
12. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. N 3. pp. 3164-3174.
13. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique // 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018
14. Ramli, M. A. M, Hiendro A., Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage // Renew. Energy. 2015. V. 78. pp. 398-405.
15. Ершов М.С., Жалилов Р.Б. Моделирование надежности систем электроснабжения с автономными источниками питания. В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики в 2-х книгах. 2019. С. 353-361.
16. Савенко А.Е., Савенко С.Е. Работа многогенераторного автономного электротехнического комплекса. Материалы 3 Международной научно-практической

конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. 2018. С. 465-469.

17. Gorodnov A.G., Kornilov V.Yu., Abdulhy Al-Ali M.A. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. V. 22. N1. pp. 69-76.

18. Abdulhy Al-Ali M.A., Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G. Optimized the performance of electrical equipment in gas separation stations (Degassing station ds) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field // Power engineering: research, equipment, technology. 2019. V.21. N (1-2). pp. 141-145.

19. Abdulhy Al-Ali M.A., Kornilov V.Y., Gorodnov A.G. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. // Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018. V.20. N (11-12). pp. 127-132.

20. Мваку У.М., Корнилов В.Ю. Электротехнические комплексы технологических комплексов основного оборудования эксплуатации скважин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2013. № 1 (16). С. 34-46.

21. Городнов А.Г. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия с автономной системой электроснабжения // Инновационная наука в глобализующемся мире. 2020. № 1 (7). С. 30-31.

22. Радкевич В. Н. Проектирование систем электроснабжения / В. Н. Радкевич. Минск: НПО «Пион», 2001. 292 с.

23. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2007. 185с.

24. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1990. 114 с.

25. Городнов А.Г. Модель электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения механизированной добычи нефти. В сборнике: технологическое развитие: тенденции, проблемы и перспективы. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2020. С. 8-10.

26. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций. В сборнике: Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Материалы Международного научно-практического форума. 2013. С. 393-397.

27. Гринкруг М.С. Выбор типов дизель-генераторов на дизельных электростанциях из условий минимального годового расхода топлива // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 18-21.

28. Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Шепелев А.О. Оптимальное управление конденсаторными батареями в распределительных сетях. В сборнике: ученые Омска - региону. Материалы II Региональной научно-технической конференции. 2017. С. 75-79.

29. Мваку У.М., Корнилов В.Ю. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия // Энергетика Татарстана. 2013. № 2 (30). С. 46-50.

30. Мваку У.М., Корнилов В.Ю. Снижение потерь и потребления электрической энергии в электротехнических комплексах нефтегазодобывающего предприятия // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2013. № 2 (17). С. 7-17.

31. Мваку У.М., Корнилов В.Ю. Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса основного оборудования нефтегазоперерабатывающего предприятия в процессе подготовки нефти. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2013. № 1-2. С. 115.

32. Dixon J., Moran L., Rodrigues J., Domke R. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review // Proc. of the IEEE. 2005. V. 93, N12. pp. 2144-2164.

33. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant // IEEE trans. on industry applications. 2011. V. 47, N2. pp. 973- 983.

34. Городнов А.Г. Согласование энергетических параметров элементов электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия. В сборнике: фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки. Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции. Уфа, 2020. С. 47-50.

35. Савенко А.Е., Савенко П.С. Исследование и оптимизация работы генераторных агрегатов автономного электротехнического комплекса. В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (19 Бенардосовские чтения). Материалы

Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. 2017. С. 9-12.

36. Городнов А.Г. Имитационная модель для определения оптимальных энергетических параметров элементов электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия. В сборнике: актуальные вопросы современной науки и практики. Сборник статей по материалам 2 Международной научно-практической конференции. Уфа, 2020. С. 44-48.

37. Савенко А.Е. Использование автономных электротехнических комплексов в нефтегазовой отрасли. В сборнике: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. Альметьевский государственный нефтяной институт. 2016. С. 218-221.

Авторы публикации

Масков Линар Рамильевич – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Корнилов Владимир Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Men'shov BG, Sud II. Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoi promyshlennosti. Moscow: Nedra; 1984.
2. Men'shov BG, Ershov MS, Yarizov AD. Elektrifikatsiya predpriyatii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti. Moscow: Nedra; 2000.
3. Shklyarskii YaE, Zamyatina EN, Zamyatin EO. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020; 3: 339-347.
4. Ershov MS, Konkin RN. Opredelenie parametrov istochnikov pitaniya elektrotekhnicheskikh komplekсов s elektrodvigatel'noi nagruzkoi. V sbornike: *Kul'tura, nauka, obrazovanie: problemy i perspektivy. Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. 2017. pp. 130-133.
5. Kozyaruk AE. Energoeffektivnye elektrotekhnicheskie komplekсы gornodobyvayushchikh i transportnykh mashin. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016; 218:261-269.
6. Ortega A, Milano F. Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016; 31(5): 3369–3380.
7. Jain A, Biyik E, Chakraborty A. A model predictive control design for selective modal damping in power systems. In *Proc. of American Control Conference*, 2015, pp. 4314–4319.
8. Xiaodong Liang. *Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system*. 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016. DOI: 10.1109/ICPS.2016.7490232.
9. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
10. Lucio Steckling, Marcelo Lobo Heldwein. *Model-Based Synchronous Optimal Modulation for Three-Level Inverters Applied to Electrical Submersible Pumps Systems*. PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Publisher: VDE. Date of Conference: 7-9 May 2019.
11. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri. *Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation*. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
12. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. *Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities*. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (3): 3164-3174.

13. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. *Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique* // 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.
14. Ramli M.A.M, Hiendro A, Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage. *Renew. Energy*. 2015; 78:398-405.
15. Ershov MS, Zhalilov RB. Modelirovanie nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s avtonomnymi istochnikami pitaniya. V sbornike: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki v 2-kh knigakh*. 2019. pp. 353-361.
16. Savenko AE, Savenko SE. Rabota mnogogeneratornogo avtonomnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli»*. Al'met'evsk: Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi instituta. 2018. pp. 465-469.
17. Gorodnov AG, Kornilov VYu, Abdulhy Al-Ali MA. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020. 22 (1): 69-76.
18. Abdulhy Al-Ali MA, Kornilov VYu, Gorodnov AG. Optimized the performance of electrical equipment in gas separation stations (Degassing station ds) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019. 21. (1-2): 141-145.
19. Abdulhy Al-Ali MA, Kornilov VY, Gorodnov AG. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018; 20(11-12):127-132.
20. Mvaku UM, Kornilov VYu. Elektrotekhnicheskie komplekсы tekhnologicheskikh kompleksov osnovnogo oborudovaniya ekspluatatsii skvazhin. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2013. 16 (1):34-46.
21. Gorodnov AG. Otsenka energoeffektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvayushchego predpriyatiya s avtonomnoi sistemoi elektrosnabzheniya. *Innovatsionnaya nauka v globalizuyushchemsya mire*. 2020. 7 (1):30-31.
22. Radkevich, VN. Proektirovanie sistem elektrosnabzheniya. Minsk: NPOOO «Pion»; 2001.
23. Kabyshev AV. Elektrosnabzhenie ob'ektov. Raschet elektricheskikh nagruzok, nagrev provodnikov i elektrooborudovaniya. Tomsk: izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2007.(Ch.1): 185.
24. Spravochnye dannye po raschetnym koeffitsientam elektricheskikh nagruzok. Moscow: VNIPI Tyazhpromelektroproekt; 1990.
25. Gorodnov AG. Model' elektrotekhnicheskogo kompleksa s avtonomnoi sistemoi elektrosnabzheniya mekhanizirovannoi dobychi nefti. V sbornike: *tekhnologicheskoe razvitiye: tendentsii, problemy i perspektivy. Sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. 2020. pp. 8-10.
26. Lukutin BV, Shandarova EB. Sposoby snizheniya raskhoda topliva dizel'nykh elektrostantsii. V sbornike: *Prirodnye resursy i ekologiya Dal'nevostochnogo regiona. Materialy Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma*. 2013. pp. 393-397.
27. Grinkrug MS. Vybory tipov dizel'-generatorov na dizel'nykh elektrostantsiyakh iz uslovii minimal'nogo godovogo raskhoda topliva. *Teploenergetika*. 2009. 11 (1): 18-21.
28. Girshin SS, Goryunov VN, Shepelev AO. Optimal'noe upravlenie kondensatornymi batareyami v raspredelitel'nykh setyakh. V sbornike: *uchenye Omska - regionu. Materialy II Regional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2017. pp. 75-79.
29. Mvaku UM, Kornilov VYu. Povyshenie effektivnosti raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa neftegazodobyvayushchego predpriyatiya. *Energetika Tatarstana*. 2013;30 (2): 46-50.
30. Mvaku UM, Kornilov VYu. Snizhenie poter' i potrebleniya elektricheskoi energii v elektrotekhnicheskikh kompleksakh neftegazodobyvayushchego predpriyatiya. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2013;17 (2):7-17.
31. Mvaku UM, Kornilov VYu. Optimizatsiya rezhimov raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa osnovnogo oborudovaniya neftegazopererabatyvayushchego predpriyatiya v protsesse podgotovki nefti. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2013.(1-2): 115.
32. Dixon J, Moran L, Rodrigues J, et al. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review. *Proc. of the IEEE*. 2005; 93 (12): 2144-2164.

33. Badrzadeh D, Smith K, Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. *IEEE trans. on industry applications*. 2011; 47 (2): 973- 983.

34. Gorodnov AG. Soglasovanie energeticheskikh parametrov elementov elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvayushchego predpriyatiya. V sbornike: *fundamental'nye i prikladnye aspekty razvitiya sovremennoi nauki. Sbornik statei po materialam II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ufa*. 2020. pp. 47-50.

35. Savenko AE, Savenko PS. Issledovanie i optimizatsiya raboty generatornykh agregatov avtonomnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. V sbornike: *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XIX Benardosovskie chteniya). Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 175-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Benardosa*. 2017. pp. 9-12.

36. Gorodnov AG. Imitatsionnaya model' dlya opredeleniya optimal'nykh energeticheskikh parametrov elementov elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvayushchego predpriyatiya. V sbornike: *aktual'nye voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Sbornik statei po materialam II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ufa*. 2020. pp. 44-48.

37. Savenko AE. Ispol'zovanie avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov v neftegazovoi otrasli. V sbornike: *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 60-letiyu vysshego neftegazovogo obrazovaniya v Respublike Tatarstan. Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut*. 2016. pp. 218-221.

Authors of the publication

Linar R. Maskov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir Y. Kornilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 29.09.2021 г.

Отредактировано 01.10.2021 г.

Принято 06.10.2021 г.

ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ БЕЗДАТЧИКОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ

А.В. Синюков¹, Т.В. Синюкова¹, Е.И. Грачева², М. Kolcun³, S Valtchev⁴

¹Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

³Technical University of Kosice, Bratislava

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследование системы управления механизмом передвижения груза при использовании разных вариантов бездатчикового управления. Поиск оптимального варианта, при котором формирование скорости происходит идентично данным, полученным с датчика скорости. Анализ полученных при исследовании результатов, в том числе, результатов, полученных с учетом нагрева обмоток двигателя. МЕТОДЫ. Задачи, поставленные при выполнении исследования, реализуются путем имитационного моделирования в среде компьютерного моделирования Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены системы с разными типами наблюдателей скорости. Реализована система учитывающая нагрев обмоток статора и ротора асинхронного двигателя, в который были внедрены неадаптивный наблюдатель и разные типы нейросетевого контроллера. Предложен совмещенный способ использования нейросетевых регуляторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Бездатчиковые системы управления актуальны для использования на производствах с присутствием, по условиям технологического процесса, высоких температур. Проведенные исследования показали, что использование нейросетевых технологий позволяет работать с параметрами разного уровня и типа. Предложенный метод, подразумевающий использование совместной работы нейросетевых наблюдателей с различной нейроструктурой позволяет осуществлять обработку скорости во всем диапазоне. Присутствующая в предлагаемой структуре связь с облачным хранилищем ведет к разгрузке системы управления, позволяя увеличить процесс анализа данных, поступающих с объекта.

Ключевые слова: Бездатчиковые системы управления; наблюдатель; моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Kolcun М., Valtchev S Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 87-98. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-87-98.

OPTIMIZED SENSORLESS CONTROL SYSTEMS FOR CARGO MOVEMENT MECHANISMS

AV. Sinyukov¹, TV. Sinyukova¹, EI. Gracheva², M. Kolcun³, S Valtchev⁴

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Technical University of Kosice, Bratislava

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Investigation of the control system of the cargo movement mechanism when using different variants of sensorless control. The search for the optimal option, in which the formation of the speed is identical to the data obtained from the speed sensor. Analysis of the results obtained during the study, including the results obtained taking into account the heating of the motor windings. *METHODS.* The tasks set during the research are implemented by simulation modeling using the Matlab Simulink computer simulation environment. *RESULTS.* The article considers systems with different types of velocity observers. A system is implemented that takes into account the heating of the stator and rotor windings of an asynchronous motor, in which a non-adaptive observer and different types of neural network controller were introduced. A combined method of using neural network regulators is proposed. *CONCLUSION.* Sensorless control systems are relevant for use in industries with the presence, according to the conditions of the technological process, of high temperatures. The conducted research has shown that the use of neural network technologies allows you to work with settings of different levels and types. The proposed method, implying the use of joint work of neural network observers with various neurostructures, allows for speed testing in the entire range. The connection with cloud storage present in the proposed structure leads to the unloading of the management system, allowing to increase the process of analyzing data coming from the object.

Keywords: Sensorless control systems; observers; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.

For citation: Sinyukov AV, Sinyukova TV, Gracheva EI, Kolcun M., Valtchev S. Optimized sensorless control systems for cargo movement mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):87-98. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-87-98.

Введение

На предприятиях, где работа электродвигателей происходит при повышенных температурах, актуально использование бездатчиковых систем управления.

Объектами исследования являются механизмы передвижения, на которых установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором управляемый частотным преобразователем.

Согласно литературе [1] существует несколько способов частотного управления, каждый из них имеет свои особенности, достоинства и недостатки:

- скалярное управление, базирующееся на математическом аппарате, реализованном в установившемся режиме. Данная система не точна в динамике при повышенной точности отработки статических характеристик [2, 3];
- векторное управление – имеет хорошие динамические показатели при использовании. В основе лежит не только изменение частоты, но и параметров двигателя [4-6];
- прямое управление моментом – характеризуется хорошей реакцией момента на управляющий сигнал [7, 8].

Для исследования была выбрана векторная система управления.

Применение бездатчикового управления позволяет повысить управляемость и экономические показатели системы, приводит к совершенствованию базовых законов частотного управления, снижает стоимость устройства [9-12].

Предлагаемая методика дает возможность исключить из системы дополнительные датчики, использование которых ведет к увеличению габаритов устройства в целом, а также, при наличии на предприятии негативных факторов окружающей среды, приводит к появлению большой погрешности показаний, оставив для адекватной работы системы только встроенные в частотный преобразователь датчики. Значение скорости, при таком подходе, фиксируется косвенно на основании доступных для измерения параметров, используемых в системе для других целей.

В настоящее время бездатчиковое управление представлено разными методиками исполнения, отличающимися степенью сложности при реализации. Предпочтение тому или иному методу отдается в зависимости от требований, предъявляемых к системе управления, в нашем случае, определяющими критериями являются диапазон управления скоростью и точность ее определения.

На основании анализа методов бездатчикового определения скорости, с учетом достоинств и недостатков рассматриваемых систем, сложности понимания и реализации

подхода, предпочтение было отдано неадаптивному типу наблюдателей и адаптивному нейросетевому наблюдателю [13, 14].

Материалы и методы

Схемное решение в среде *Matlab Simulink* асинхронного двигателя и системы управления двигателем

В среде *Matlab Simulink* согласно математическому аппарату, приведенному в [1] собрана схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 1). В основе лежит Т-образная схема замещения, реализованная посредством математических операций, описывающих переходные процессы, происходящие в асинхронном двигателе, выбранная при моделировании система координат является неподвижной.

Следующим этапом стала разработка в среде *Matlab Simulink* векторной системы управления для привода перемещения груза.

Реализация системы с неадаптивными наблюдателями

Реализация неадаптивных наблюдателей завязана на математике, лежащей в основе работы асинхронного двигателя в неподвижной системе координат. Значение скорости, в наблюдателях токаго типа определяется через известные параметры несколькими способами, одним из вариантов является метод, базирующийся на данных о напряжении и токе статора, величине частоты питающего напряжения и значении частоты роторной электродвижущей силы [15]. Математическая модель такого типа наблюдателя приведена на рисунке 2.

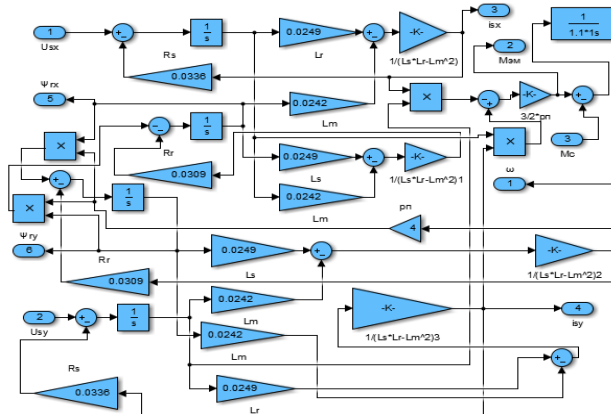


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя в среде *Matlab Simulink*

Fig.1. Asynchronous motor model in *Matlab Simulink*

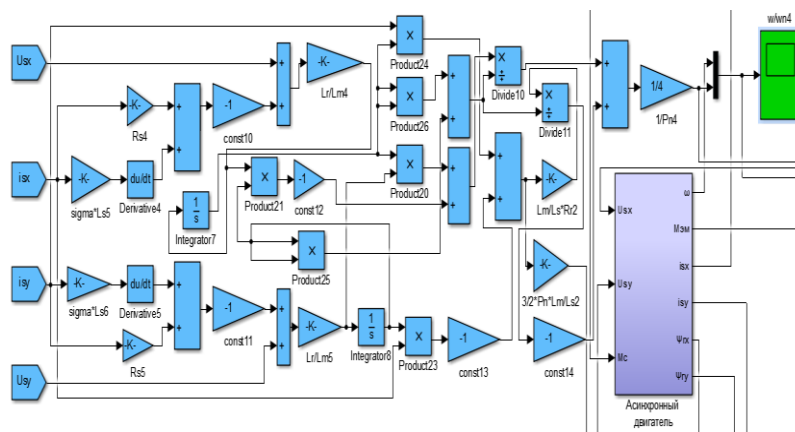


Рис. 2. Модель неадаптивного наблюдателя

Fig.2. Adaptive Observer model

На рисунке 3 представлен график изменения скорости при моделировании в среде *Matlab Simulink* системы с неадаптивным типом наблюдателя, данные с которого сравниваются с данными с датчика скорости, роль которого выполняет сигнал по скорости выведенный из модели асинхронного двигателя. Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод об адекватной работе принятого для исследования неадаптивного наблюдателя. Рассхождение графиков скорости фиксируется примерно на уровне 0,15%.

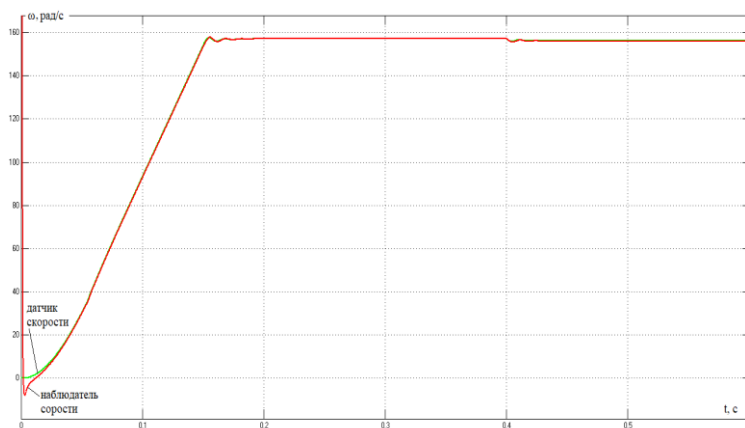


Рис. 3. Зависимость скорости от времени в системе с неадаптивным наблюдателем и датчиком скорости

Fig. 3. The dependence of speed on time in a system with a non-adaptive observer and a speed sensor

Реализация системы с учетом нагрева обмоток двигателя

Реализованный в среде *Matlab Simulink* неадаптивный наблюдатель скорости не имеет возможности осуществлять учет нагрева обмоток двигателя в процессе его работы. Для решения данной проблемы были внесены корректировки в математическую модель асинхронного двигателя, что позволило снять показания скорости двигателя получаемые с датчика скорости и посредством неадаптивного наблюдателя при различных значениях нагрева обмоток двигателя. Приведенная на рисунке 4 схема асинхронного двигателя отражает состояние системы, когда обмотки двигателя нагреваются на четверть от номинальных значений.

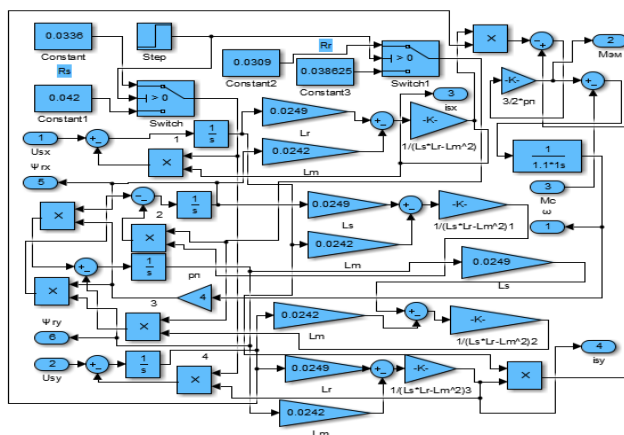


Рис. 4. Модель двигателя в среде *Matlab Simulink*, учитывающая нагрев обмоток двигателя

Fig.4. An engine model in the *Matlab Simulink* environment that takes into account the heating of the engine windings

На рисунке 5 представлены, полученные в результате моделирования предлагаемой системы характеристики. Анализ полученных графиков скорости позволяет сделать вывод о наличии ошибки в процессе выхода скорости в системе с неадаптивным наблюдателем на значение, которое по данным с датчика скорости является установившимся, также присутствует явно выраженный колебательный характер в диапазоне выхода характеристики с неадаптивным наблюдателем на номинальное значение. Использование наблюдателя скорости в системе с изменением сопротивлений статора и ротора в результате нагрева обмоток приводит к появлению ошибки пропорциональной величине нагрева обмоток двигателя.

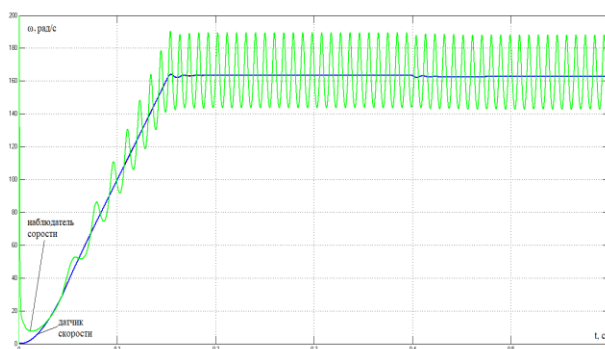


Рис. 5. Зависимость скорости от времени в системе, учитывающей нагрев обмоток

Fig.5. The dependence of speed on time in a system that takes into account the heating of the windings

Реализация системы с нейросетевыми наблюдателями

Нейросетевые системы занимают в последнее время прочные позиции во многих областях человеческой деятельности благодаря таким возможностям нейронной сети, как умение обучаться в процессе решения поставленных задач, умение осуществлять прогноз предстоящих событий.

Для дальнейшего исследования из библиотеки *Neural Network Toolbox* выбран нейронный контроллер *NARMA-L2* с леаринезованной обратной связью. Выбор на данном типе наблюдателя остановлен в связи с тем, что для его функционирования не нужны значительные вычислительные затраты. Представленная на рисунке 6 структура наблюдателя получена путем введения обучающего массива данных и задания параметров, являющихся ключевыми для архитектуры сети.

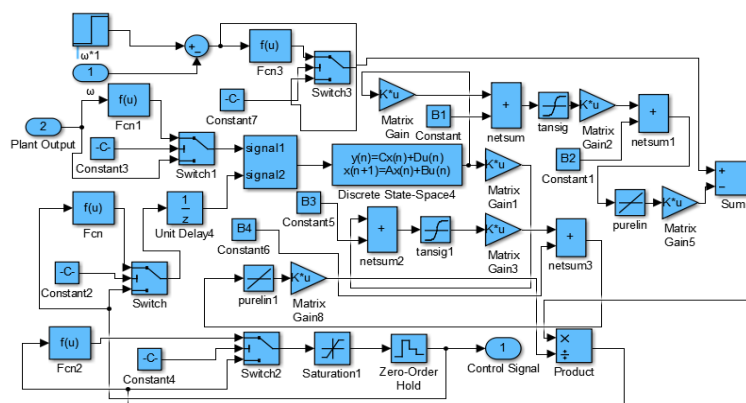


Рис. 6. Структура нейроконтроллера NARMA-L2

Fig. 6. The structure of the NARMA-L2 neurocontroller

На следующем этапе необходимо выполнить процесс обучения сети с нейронной структурой. В исследовании для этих целей выбрана методика Левенберга-Маркара, обладающая приемлемым показателем точности алгоритмов осуществляющих процесс обучения сети с нейронной структурой.

Объединенные результаты моделирования переходного процесса по скорости в трех системах – с датчиком скорости, с неадаптивным наблюдателем и с нейросетевым контроллером представлены на рисунке 7.

На основании представленных, на рисунке 7 графиков скорости можно сделать вывод, что применение нейросетевого контроллера увеличивает точность отработки скорости, позволяет устранить колебания, возникающие в переходных процессах при использовании наблюдателя неадаптивного типа. Выход скорости на установившийся режим также показал хорошую точность отработки при использовании наблюдателя нейросетевого типа.

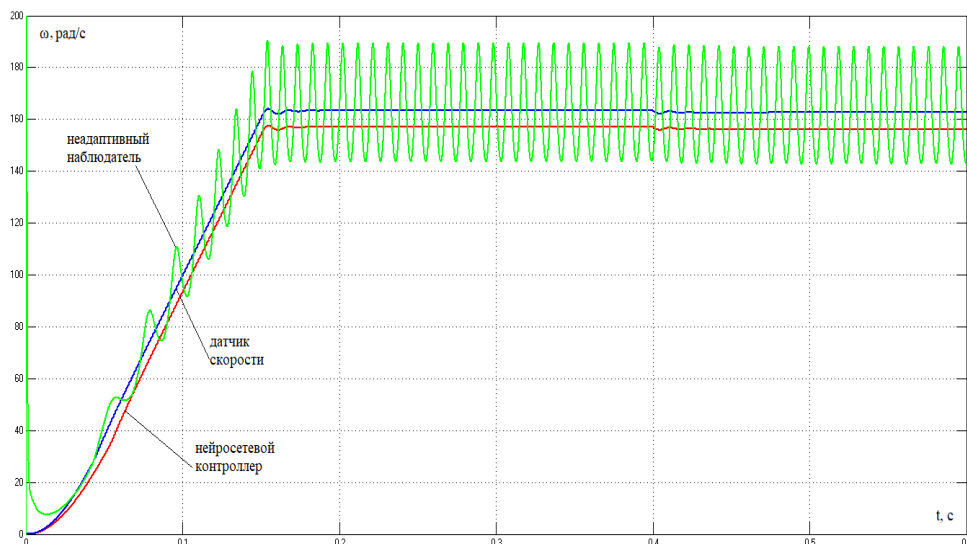


Рис. 7. Временные характеристики скорости

Fig. 7. Temporary speed characteristics

Следующим наблюдателем, для исследования стал *Predictive* нейроконтроллер, принцип его работы основан на прогнозировании реакций, которые могут возникнуть у объекта на разного типа управляющие сигналы. В структуре данного типа нейроконтроллера присутствует алгоритм адаптации, в функции которого входит вычисление сигналов управления таким образом, чтобы они позволяли оптимизировать отклик с управляемого объекта. Задав необходимые параметры и выполнив необходимые настройки, получим структурную схему *Predictive Controller*, представленную на рисунке 8.

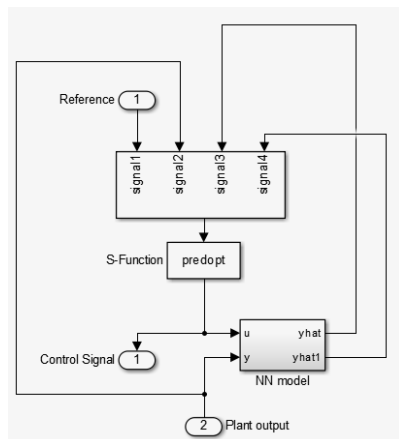


Рис. 8. Структура нейроконтроллера *Predictive Controller*

Fig. 8. Structure of the *Predictive Controller* neurocontroller

Структура блока *NN model* представлена на рисунке 9.

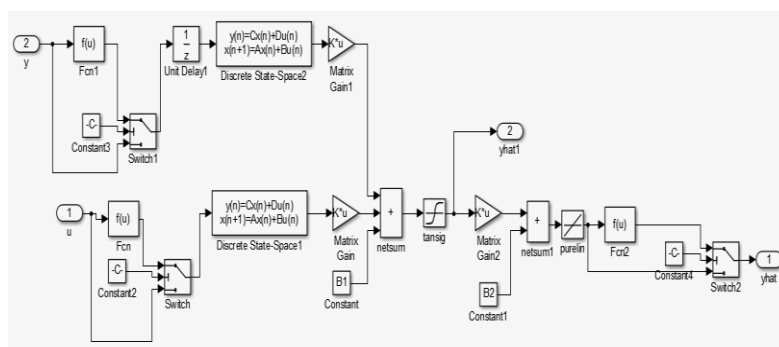


Рис. 9. Блок *Predictive Controller*

Fig. 9. *Predictive Controller* Block

Результаты моделирования приведены на рисунке 10. Также, как и в предыдущем исследовании, использование нейросетевого наблюдателя *Predictive Controller* позволяет получить приемлемые скоростные характеристики как в переходном, так и в установившемся режиме.

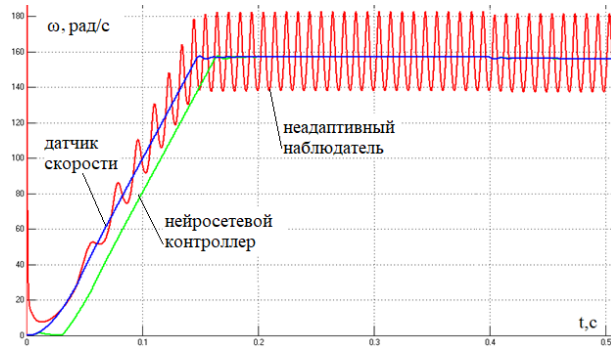


Рис.10. Графики скорости

Fig. 10. Speed charts

Еще одним типом нейросетевого наблюдателя является *Model Reference Controller* (рис. 11), данный регулятор имеет двухфакторную систему обучения, обучение одной из которых осуществляется в режиме оффлайн.

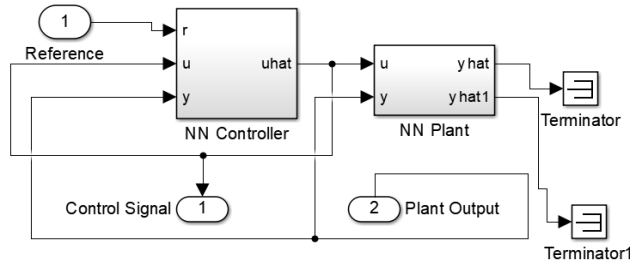


Рис.11. Эталонный контроллер модели

Fig. 11. Model Reference Controller

Внутренняя структура блоков *NN Controller* и *NN Plant* представлена на рисунках 12 и 13.

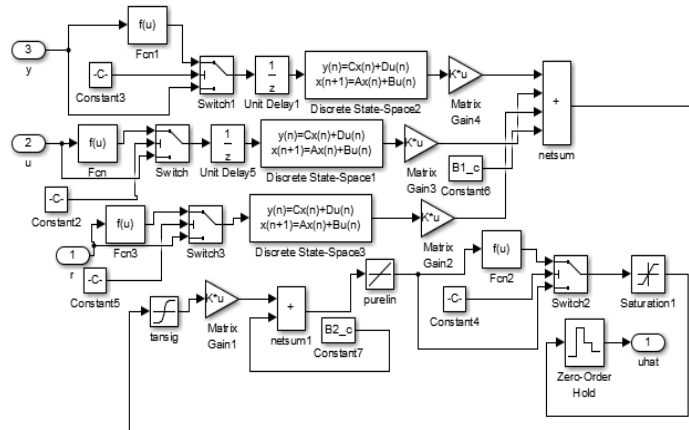


Рис.12. Структура блока *NN Controller*

Fig. 12. Structure of the *NN Controller* block

Путем моделирования в среде *Matlab* выполнено исследование устойчивости работы данного типа наблюдателя. Результаты, приведенные на рисунке 14 позволяют сделать вывод об адекватной и приемлемой работе и данного типа нейросетевого наблюдателя.

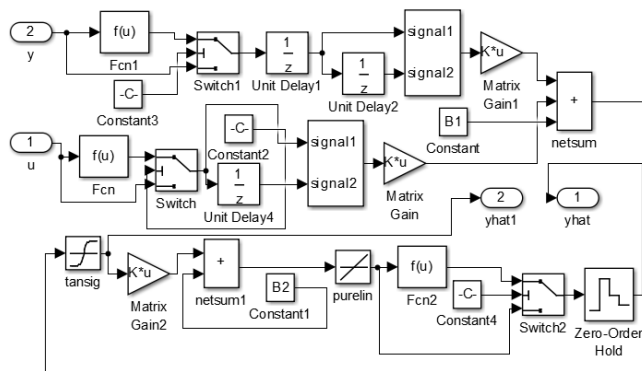


Рис.13. Структура блока NN Plant

Fig. 13. Structure of the NN Plant block

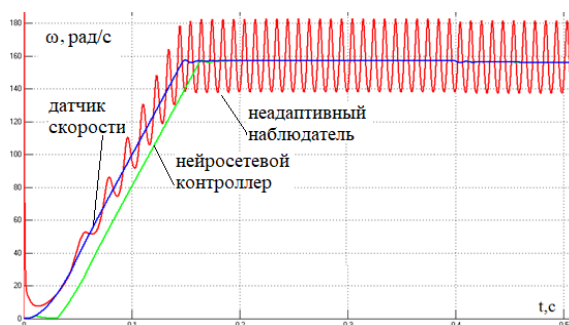


Рис.14. Поведение скорости, в системах с разными типами наблюдателей

Fig. 14. Speed behavior, in systems with different types of observers

Результаты и Обсуждение

Анализ результатов моделирования систем с разными типами нейросетевых контроллеров показал их хорошую робастность. Но есть значительные недостатки у наблюдателей такого типа в виде большой нагрузки на аппаратные ресурсы, с которой могут справиться не все процессоры. Частичная разгрузка систем возможна при использовании совмещенной работы наблюдателей неадаптивного и нейросетевого типа.

Использование неадаптивного наблюдателя целесообразно в установившихся режимах, а при переходных процессах оптимальным является работа нейросетевого наблюдателя.

Принцип действия предлагаемой совмещенной системы заключается в следующем, сигнал задания из системы управления поступает на один из типов наблюдателей, в зависимости от его характера, с наблюдателей сигнал подается на механизм адаптации, а с него снова в систему управления.

Графики, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке15.

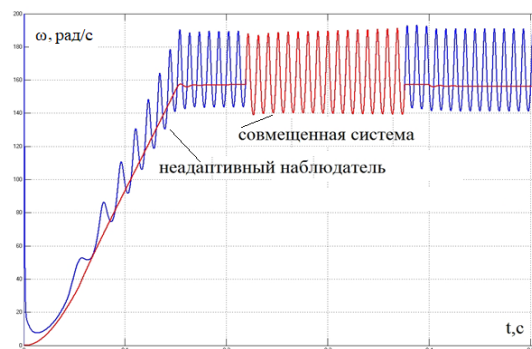


Рис.15. Формирование скорости, в совмещенной системе и в системе с неадаптивным

Fig. 15. Speed formation, in a combined system and in a system with a non-adaptive

Предлагаемое решение показало, что система работоспособна, однако присутствуют явно выраженные колебательные процессы в установившихся режимах.

Дальнейшее исследование было направлено на подбор оптимального соотношения работы различных типов наблюдателей с совмещенной системе.

Бездатчиковые системы актуальные для исследования и внедрения на действующие механизмы. Реализация таких систем возможна с использованием облачного хранилища, в которое поступают данные со *Smart Sensor*, далее данные подлежат обработке, а после этого применяются для обучения нейросетевых регуляторов. Данная технология дает возможность использовать наблюдатели с нейроструктурами, обучение которых происходит по разным исходным параметрам в одной системе. Каждый из наблюдателей будет выполнять свои функции.

Предлагается система с двумя нейросетевыми наблюдателями (рис. 16), на вход первого поступает значение заданного параметра скорости, второй наблюдатель реагирует на величину нагрева обмоток двигателя. Выходные сигналы с наблюдателей поступают на механизм адаптации, который осуществляет коррекцию функционирования системы, базируясь на данных, заложенных в системе обучения и данных о температурном состоянии обмоток, путем введения в работу в текущий момент времени одного из наблюдателей.

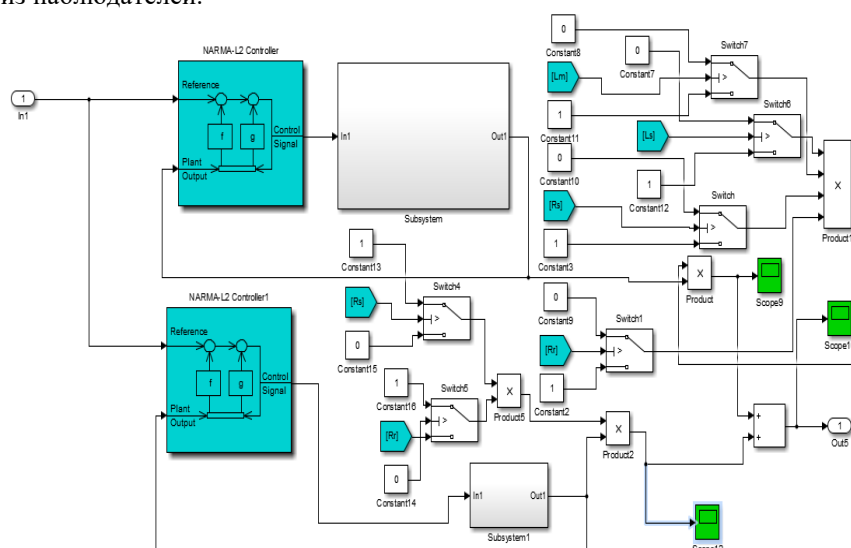


Рис.16. Система с совмещенной работой нейросетевых наблюдателей

Fig. 16. A system with combined work of neural network observers

Результаты моделирования представлены на рисунке 17. Полученная характеристика не имеет колебаний на всей протяженности, отработка скорости идет во всем диапазоне.

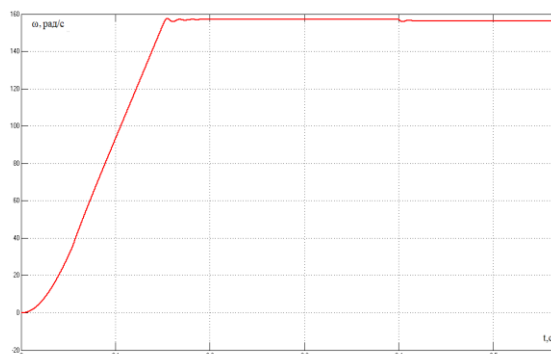


Рис.17. Формирование скорости, в совмещенной системе

Fig. 17. Speed formation, in a combined system

Предложенный вариант совмещенного функционирования нейросетевых регуляторов, имеющий связь с облачными хранилищами, позволит разгрузить нагрузку на

систему управления электроприводом, приведя к увеличению скорости анализа данных на этом уровне.

Выводы

Использование бездатчиковых систем управления снижает габариты устройств, делает их применение возможным на объектах с повышенными температурами.

Реализованные нейросетевые наблюдатели позволили избавиться от колебательного характера скорости, присущего системам с неадаптивными наблюдателями.

Нейросетевые регуляторы позволяют работать с данными разного типа и уровня автоматизации.

Применение облачных пространств позволяет снизить нагрузку на аппаратную часть.

Литература

1. Соколовский Г.Г., Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия. 2006. 265 с.
2. Фираго Б.И., Александровский С.В. Свойства, характеристики и параметры синхронного двигателя постоянными магнитами при векторном и скалярном частотном управлении // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С.205-218.
3. Shayakhmetova L.V., Kharitonov V.L. Stabilization of a scalar equation with delay in the state and control variables // Vestnik of saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2014. № 4. pp. 144-150.
4. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia. 2020. V. 220. 01059, October 29-30.
5. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Boikov A., Mukhametzhanov R. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
6. Даденков Д.А., Солоцкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С.117-128.
7. Chunyun Fu, Minghui Hu. Adaptive sliding mode-based direct yaw moment control for electric vehicles // 2015 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Changshu, China, 2015, 15634631, October 29-31.
8. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).
9. Синюков А.В., Синюкова Т.В. Наблюдатели состояния в системах управления электроприводом с синхронным двигателем // Системы управления электротехническими объектами (СУЭТО-8): труды восьмой всероссийской научно-практической конференции, Тула. 2018. С. 64–66.
10. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1 (113). С. 111-120.
11. Gracheva Y.I., Chernova N.V., Fedotov A.I., Fedotov E.A. Local Fourier transformation application for mathematic modeling of synchronous machine valve actuator, Journal of engineering and applied sciences. 2016. V.11. №1. 2939-2945.
12. Mairaj Ali, Muwahida Liaquat. Comparison Between Distributed Observer And Adaptive Distributed Observer // 2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Maharashtra, India. 2018. 18132759 (15-17 June).
13. Mikhail P. Belov, Nguyen Van Lanh, Tran Dang Khoa. State Observer based Elman Recurrent Neural Network for Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. St. Petersburg, Moscow, Russia. 20553530. (26-29 January).
14. Hu Z., Bodyanskiy Y.V., Tyshchenko O.K., A Multidimensional Adaptive Growing

Neuro-Fuzzy System and Its Online Learning Procedure // *Advances in Intelligent System and Computing* 689. 2018. pp. 186-203.

15. Сляяр А.В., Чижма С.Н., Чегодаев Ф.В. Бездатчиковый контроль частоты вращения ротора асинхронного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2017. Т. 60. № 1. С.14-19.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – аспирант, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: stw0411@mail.ru.

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

Michal Kolcun – professor, Technical University of Kosice.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

References

1. Sokolovsky GG. *Alternating current electric drives with frequency control*. M.: Academy. 2006. 265 p.

2. Firago BI, Alexandrovsky SV. Fananana, ny toetra sy ny masontsivana ny synchronous maotera amin'ny maharitra lasibatra ao vector sy scalar matetika fanaraha-maso. *Angovo. Fitsarana ambony toeram-pampianarana sy ny hery-ny fikambanana ny CIS*. 2019;62(3):205-218.

3. Shayakhmetova LV, Kharitonov VL. Stabilization of a scalar equation with delay in the state and control variables. *Vestnik of saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2014;4:144-150.

4. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems. *E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.

5. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor. *High Speed Turbomachines and Electrical Drevs Conference 2020 (HSTED-2020)*, Prague, Czech Republic.

6. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universitete. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.

7. Chunyun Fu, Minghui Hu. *Adaptive sliding mode-based direct yaw moment control for electric vehicles*. 2015 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Changshu, China, 2015, 15634631, October 29-31.

8. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, PD. Shendge, et al. *Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs*. 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

9. Sinyukov AV, Sinyukova TV. *Observers of the state in control systems of an electric drive with an asynchronous motor*. Control systems of electrotechnical objects (SUETO-8): proceedings of the eighth All-Russian Scientific and practical conference, Tula. 2018. pp. 64-66.

10. Ostrovlyanchik VYu. Popolzen IYu. Asynchronous motor model for sensorless information and control systems of automated electric drive. *Bulletin of the Kuzbass State Technical Un1* (113). pp. 111-120.

11. Gracheva YI, Chernova NV, Fedotov AI, Fedotov EA. Local Fourier transformation application for mathematic modeling of synchronous machine valve actuator. *Journal of engineering and applied sciences*. 2016;11(1):2939-2945.

12. Mairaj Ali, Muwahida Liaquat. *Comparison Between Distributed Observer And*

Adaptive Distributed Observer. 2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Maharashtra, India. 2018. 18132759 (15-17 June).

13. Mikhail P. Belov, Nguyen Van Lanh, Tran Dang Khoa. *State Observer based Elman Recurrent Neural Network for Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes*. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. St. Petersburg, Moscow, Russia. 20553530. (26-29 January).

14. Hu Z, Bodyanskiy YV, Tyshchenko OK, A *Multidimensional Adaptive Growing Neuro-Fuzzy System and Its Online Learning Procedure*. Advances in Intelligent System and Computing. 689, 2018;689:186-203.

15. Sklyar AV, Chizhma SN, Chegodaev FV. Sensorless control of the rotor speed of an asynchronous motor. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2017;60(1):14-19.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Michal Kolcun – Technical University of Kosice.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

Получено

02.12.2021 г.

Отредактировано

03.12.2021 г.

Принято

06.12.2021 г.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть применение судов специального назначения с системой динамического позиционирования. Провести наблюдения и исследования работы электротехнических комплексов таких судов на предмет существования в них проблем, оказывающих влияние на выполнение технологических операций. Предложить методы и средства, направленные на устранение ситуаций и процессов, отрицательно сказывающихся на работе судовых электротехнических комплексов при прокладке трубопроводов. *МЕТОДЫ.* Для проведения наблюдений и исследований рассмотрен единый электротехнический комплекс с электрическими винторулевыми колонками и системой прокладки подводного трубопровода кабелеукладчика «Seven Vega». Собрана информация о всех основных электротехнических системах судна «Seven Vega». Проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение режимов работы электротехнического комплекса при прокладке трубопроводов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены экспериментальные осциллограммы токов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов в различных режимах. Отмечено существование обменных колебаний мощности при работе единой электроэнергетической системы кабелеукладчика «Seven Vega». Получены данные об отрицательном влиянии колебаний мощности на работу натяжителей при укладке подводных трубопроводов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование морских судов с динамическим позиционированием для прокладки трубопроводов и выполнению работ по добыче нефти и газа требует обеспечения работы их электротехнических комплексов. Для обеспечения качественной работы натяжителей в системах прокладки трубопроводов необходимо обеспечить настройку их регуляторов и исключить возникновение обменных колебаний мощности при параллельной работе генераторных агрегатов.

Ключевые слова: обменные колебания мощности; параллельная работа; судовой электротехнический комплекс; генераторный агрегат; динамическое позиционирование; азимутальная винторулевая колонка.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 99-108. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-99-108.

SUPPORTING THE OPERATION OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM OF MODERN SPECIAL PURPOSE VESSELS WITH DYNAMIC POSITIONING

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the use of special purpose vessels with a dynamic positioning system. To conduct observations and research of the operation of electrical power systems of such vessels for the existence of problems in them that affect the performance of technological operations. To propose methods and means aimed at eliminating situations and processes that adversely affect the operation of shipboard electrical power systems when laying

pipelines. METHODS. For observation and research, the unified electrical power systems with electric rudder propellers and a system for laying an underwater pipeline of the "Seven Vega" cable layer was considered. Collected information on all the main electrical systems of the vessel "Seven Vega". Experimental studies were carried out aimed at studying the operating modes of the electrical power system during the laying of pipelines. RESULTS. Experimental oscillograms of currents of parallel operating diesel-generator sets in different modes have been obtained. The existence of power exchange oscillations during the operation of the unified electric power system of the cable-laying ship "Seven Vega" is noted. The data on the negative influence of power oscillations on the operation of tensioners during the laying of underwater pipelines were obtained. CONCLUSION. The use of sea-going vessels with dynamic positioning for laying pipelines and performing oil and gas production operations requires ensuring the operation of their electrical power systems. To ensure the high-quality operation of tensioners in pipeline laying systems, it is necessary to ensure the adjustment of their regulators and to exclude the occurrence of power exchange oscillations during parallel operation of generator sets.

Keywords: power exchange oscillations; parallel operation; ship electric power system; generating set; dynamic positioning; azimuth rudder.

For citation: Savenko AE., Savenko PS. Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):99-108. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-99-108.

Введение

Система динамического позиционирования (DP) устанавливается на судах, выполняющих технологические операции по разведке и добыче запасов газа и нефти, а также прокладке трубопроводов [1-5]. Функционирование такой системы тесно связано с работой всего электротехнического комплекса судна [6, 7]. С одной стороны это зависимость от наличия вырабатываемой на судне электроэнергии, с другой – необходимость управлять специальными электроприводами, обеспечивающими движение плавучего объекта [8-10]. Необходимо отметить, что на судах с динамическим позиционированием устанавливаются азимутальные электрические винторулевые колонки и подруливающие устройства в составе единой электроэнергетической системы [3].

Так, например, системы *Kongsberg K-Pos* - это компьютеризированные системы для автоматического управления положением и курсом судна. Для управления курсом судна система управления DP использует данные одного или нескольких гирокомпасов, в то время как по крайней мере одна система координатного положения (например, DGPS) или гидроакустика) позволяет системе управления DP позиционировать судно. Заданные значения для курса и положения задаются оператором, а затем обрабатываются системой управления DP для подачи сигналов управления на подруливающее устройство и главные гребные винты судна. Система DP всегда распределяет оптимальную тягу между используемыми силовыми установками. Отклонения от желаемого курса или положения автоматически обнаруживаются и система вносит соответствующие корректировки. Система управления DP также обеспечивает ручное управление с помощью джойстика, которое может использоваться для управления одним джойстиком или для комбинированного ручного / автоматического управления. Система управления DP включает стратегии управления, которые снижат расход топлива и выброс парниковых газов.

На морское судно действуют силы ветра, волнения водной поверхности и течения. В противовес им создаются силы электроэнергетической двигательной установки с пропульсивным комплексом. В результате взаимодействия всех этих сил судно движется по заданному курсу, а его местоположение отслеживается датчиками и гирокомпасом. Скорость и направление ветра измеряются датчиками ветра. Система управления *K-Pos* рассчитывает и распределяет по движителям усилия для движения судна с тремя степенями свободы в горизонтальной плоскости - помпаж, раскачивание и рыскание.

Система *K-Pos* предназначена для удержания судна в заданных пределах положения и курса, а также для минимизации расхода топлива и износа силового оборудования. Упрощенная блок-схема системы *K-Pos* показана на рисунке 1.

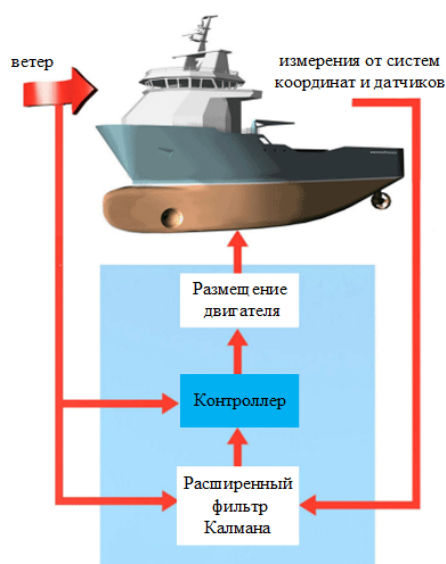


Рис.1. Блок-схема системы K-Pos

Fig.1. Block diagram of the K-Pos system

Таким образом, электротехнический комплекс судов специального назначения, осуществляющих добычу подводную добычу углеводородов и прокладку трубопроводов, неразрывно связан с системами управления движением [11]. Большой практический интерес представляет взаимодействие всех генерирующих мощностей и электрических приводов в условиях работы системы динамического позиционирования. Это связано с выполнением повышенных требований к плавучим объектам для исключения повторения экологических катастроф, подобных аварии в Мексиканском заливе в 2010 году на буровой платформе *Deepwater Horizon*.

Материалы и методы

В 2019 году *Subsea 7* и *Royal IHC* успешно спустили на воду полностью интегрированное катушечное судно для прокладки гибкого подводного трубопровода «*Seven Vega*» (рис. 2). Церемония прошла на верфи IHC в Кримпен-ан-ден-Эйссел, Нидерланды, ее провела Моника Бьёркманн, вице-президент *Subsea 7* в Норвегии. Стюарт Фитцджеральд, исполнительный вице-президент по стратегии и коммерческой деятельности *Subsea 7*, сказал: «Судно знаменует собой важную инвестицию в будущее».



Рис.2. Кабелеукладчик «Seven Vega»

Fig.2. Cable laying machine "Seven Vega"

В начале 2020 года судно «*Seven Vega*» стало одним из самых мощных и экономически эффективных катушкодержателей судов на рынке и глобальным инструментом для развития *Subsea 7*. Оно было разработано для предоставления поточных технологий, отвечающих растущей рыночной тенденции к более длительным и сложным разработкам для ответвлений. Современная система укладки трубопроводов на судне ориентирована на безопасность экипажа, эффективность работы и гибкость. Эта система способна устанавливать сложные жесткие выкидные трубопроводы, включая системы «труба в трубе» и выкидные трубопроводы с электрическим обогревом, на глубине до 3000 метров. Дэйв Вандер Хейде, генеральный директор *Royal*

ИНС сказал «Мы очень гордимся достижением этой вехи в этом впечатляющем проекте. Наше партнерство с *Subsea 7* снова оказалось успешным, и мы рады повысить ценность их передового флота. Интегрированный подход ИНС к проектированию судов сделал *Subsea 7* ведущим в отрасли активом, который устанавливает новый стандарт прокладки трубопроводов на море». Компания ИНС разработала «*Seven Vega*» в тесном сотрудничестве с *Subsea 7*. Несколько инновационных функций делают «*Seven Vega*» самым технологичным судном на сегодняшний день. Его компактные размеры являются результатом творческого размещения трех машинных отделений и главного барабана, эффективного использования надстройки и башни-трубоукладчика с низкой тягой. Благодаря разумному использованию пространства открывается большая кормовая рабочая палуба, а оптимизированное распределение массы сводит к минимуму потребность в балластной воде. При разработке системы укладки барабана основное внимание уделялось безопасности экипажа, эффективности работы и гибкости. Пандус укладки трубопровода с двойным натяжителем наклоняется, что позволяет прокладывать трубопровод с мелководья на глубину до 3000 м. Большая многоуровневая рабочая станция оптимизирует эффективность операций на огневом рубеже и вокруг него, а креативное расположение основного и вспомогательного барабанов, утопленных в основную палубу, обеспечивает гибкость полезной нагрузки. Кроме того, полностью электрический главный кран *Huisman* позволяет быстро регулировать параметры подъема без необходимости вручную настраивать активную систему подъема. Благодаря меньшему количеству компонентов также сокращается техническое обслуживание и потребление энергии. «*Seven Vega*» имеет общую длину 149 м, ширину 33 м и систему динамического позиционирования класса 3. Его система укладки барабана имеет максимальное натяжение 600 т, состоящее из 32-метровой основной катушки и 17-метровой вспомогательной катушки с максимальной емкостью хранения 5600 и 1600 тонн соответственно. «*Seven Vega*» оснащена кранами грузоподъемностью 250 и 50 тонн, а также несколькими небольшими кранами, а также двумя рабочими системами ROV с боковым спуском. Это судно-трубоукладчик является девятым судном, которое ИНС построило для *Subsea 7*.

«*Seven Vega*» – это суперсовременное трубоукладочное судно с высокими техническими характеристиками и технологиями (табл. 1), которое ориентированно на безопасность экипажа, эффективность работы и гибкость.

Таблица 1

Информация о судне кабелеукладчике «*Seven Vega*»

Флаг государства приписки	Остров Ман
Основные размеры	
Общая длина	149,2 м
Ширина	33 м
Глубина до главной палубы	13 м
Эскизный проект	8,3 м
Дедвейт	10800 т
Валовая вместимость	21,334 т
Чистая вместимость	6400 т
Главная палуба	
Площадь палубы (главная палуба)	800 м ² (приблизительно)
Прочность настила	10 т / м ²
Вместимость резервуаров (100%)	
Морской газойль	2 900 м ³
Питьевая вода	725 м ³
Балластная вода	3900 м ³
Техническая вода (в баке ВБ)	1,680 м ³
Резервуары крена / стабилизатора	1,200 м ³
Мощность и тяга	
Главные двигатели / генераторы	3х 3500 кВт 3х 4000 кВт
Силовая установка 3 кормовых азимутальных подруливающих устройства	мощностью 3200 кВт
2 выдвижных носовых азимутальных подруливающих устройства	мощностью 2400 кВт
2 носовых туннельных подруливающих устройства	мощностью 2200 кВт

Продолжение таблицы 1

Скорость / тяга	
Скорость обслуживания	около 13 узлов.
Максимальное тяговое усилие	100 т (в режиме отказа DP3)
Системы DP	
Классификация DP	DP (AAA) класса III
Система DP	Kongsberg
Эталонные системы	3x DGPS 2x HiPAP Интерфейс HPR, Radius Spot Track
Краны	
Главный кран с компенсацией вертикальной качки	250т, 3000м, АНС
Вспомогательный палубный кран	1 по 50т, 3000м, АНС
Вспомогательный палубный кран	2 по 20т
Кран верхний рамный	20т
Вспомогательные краны сертифицированы для работы с людьми, как и основной крановый подъемник.	
Размещение	
120 человек	
Люксы	4
Одноместные каюты	42
Двухместные каюты	37
Система укладки труб	
Судно оснащено двумя барабанами. Максимальная вместимость основного барабана составляет 5600 т, и он может хранить продукты диаметром от 4 до 20 дюймов. Вторичная катушка - 1600 т. Максимальная комбинированная грузоподъемность - 5600 тонн. Максимальное динамическое верхнее натяжение 600т. Это от верхнего натяжителя 162т, нижнего натяжителя 318т и от заднего натяжения 120т. Система может использовать PLET размером 5 x 5 x 10 м. Система оснащена двумя лебедками для утилизации и восстановления грузоподъемностью 325 т. Их можно использовать в комбинированном режиме для восстановления веса контактной сети в 600 тонн.	
Прочие параметры;	
Угол рамп	45 °-95 °
Контейнерный привод	DEH и жесткий
Максимальное натяжение гибкой трубы	210т
Диаметр выравнивателя	21м.
Натяжитель с намоткой	На 75 тонн
Двухуровневая рабочая станция и передвижная платформа	
Выпрямитель для труб 14 x 18 дюймов "труба в трубе"	
Системы ROV	Судно оснащено двумя стационарно установленными бортовыми системами подводного плавания XLX-EVO ROV рабочего класса, рассчитанными на дальность до 3000 м.
Вертолетная площадка	Вертолетная площадка одобрена для использования с Super Puma, S61N, S76 и S92. Kongsberg HMS 100 установлен.
Системы связи	Судно оснащено широкополосным доступом в Интернет.

Результаты

На судне «Seven Vega» при работе главного крана *Huisman* в режиме компенсации качки и спуска груза рекуперируется в сеть значительная мощность. Для предотвращения перехода дизель-генераторных агрегатов в режим обратной мощности удалось решить проблему все-таки резисторами суммарной мощностью в 5000 кВт, которые называются *base load resistors*. В отличие от судна «*Pionering Spirit*» с краном *Huisman* на 5000 тонн, где аналогичная проблема не решается с помощью резисторов [12], на «*Seven Vega*» установлен кран на 250 тонн, и соответственно выделяемые в сеть мощности разные на порядок.

Реализация работы главного крана на судне «*Seven Vega*» с технической стороны очень удачная, но не экономичная. Отдельные частотные преобразователи установлены

на резисторы с общей DC шины. При включении крана, частотный преобразователь очень плавно поднимает нагрузку на резисторы до 3600 кВт, а за это время, если необходимо, запускается дополнительный дизель-генератор. Далее, если начинается подъем на полной скорости, то электромоторы нагружаются, а с резисторов нагрузка убираться так, что на ГРЩ не происходит изменения нагрузки, ведь дизель-генератор не может мгновенно выдать на 4000 кВт больше.

В случае уменьшения скорости подъема, электродвигатели начинают потреблять меньше и частотные преобразователи увеличивают мощность, подаваемую на резисторы. При начале опускания груза задействуется ещё секция резисторов на 2000 кВт, ее может не хватить и все равно появляется обратная мощность, но всего в пределах 1000 кВт, а потребление судна даже при стоянке в порту составляет более 1000 кВт. В итоге дизель-генераторные агрегаты никогда не переходят в режим обратной мощности, а при опускании нагрузка на дизель-генераторы уменьшается с 1500 кВт до 500 кВт.

На судне повсеместно используется электрический привод, даже грузовые лебедки грузоподъемностью по 300 тонн имеют полный электропривод. На каждой такой лебедке установлены по 8 электродвигателей мощностью по 300 кВт.



Рис.3. Натяжитель (тензионер) до аварии

Fig.3. Tensioner (tensioner) before the accident

Серьезная проблема, возникшая с натяжителем трубы (рис. 3), привела к многодневному простоев судна. Простой одного дня судна обходится в 180 тыс. долларов. На натяжителе для намотки трубы на барабан, или как его называют – тензионере, не работала должным образом одна из четырех гусениц, которая обжимает трубу и тянет. Частотный преобразователь, подающий питание на тянущий электродвигатель, остановил гусеницу по ошибке энкодера обратной связи (не плавное изменение положения ротора электромотора). Причём остановка по этой ошибке произошла за 1 секунду, включив подачу DC на электродвигатель и затем активировав механические тормоза, а в это время барабан продолжал наматывать трубу. Барабан также пошёл на «стоп», но чтобы остановить с полной скорости барабан весом в 5600 тонн, нужно не менее 7 секунд. В результате труба вырвала этот натяжитель с рамы (рис. 4).

На рисунке 4 видно, как гусеницы, обжимающие трубу, остановились и вырвали сам теншенер с рамы, когда усилие выросло выше 170 тонн на трубе от барабана.



Рис.4. Натяжитель (тензионер) после аварии

Fig.4. Tensioner (pensioner) after the accident

Это не единственная проблема с натяжителями. Большие сложности вызывает настройка управления натяжителем (теншенером). Смысл настройки состоит в том, что труба под своим весом опускается, и между барабаном с намотанной трубой и выходом

из судна стоит теншенер, который пытается держать постоянное усилие между собой и барабаном, ориентировочно 80 тонн. А за бортом вес трубы составляет примерно 300 тонн. В результате электродвигатели натяжителя работают в режиме генерации мощности (он же тормозит груз) и не получается настроить частотные преобразователи на корректную работу. Если частотный преобразователь «видит», что момент у электродвигателя снижается, он снижает скорость вращения поля и скольжение двигателя должно увеличиться, а также должен увеличиться тормозной момент. Но, все элементы нелинейные и добиться стабильной совместной работы восьми синхронизированных электродвигателей с индивидуальными частотными преобразователями не получается. Установка, конечно, работает, но диапазон изменения усилия составляет от 650 до 800 кН. Это очень много, так как допустимый разброс должен составлять максимум 20 кН.

Натяжители для разматывания трубы с барабана в 5 раз мощнее и больше, чем натяжители для наматывания на него. Это четыре гусеничных трака, которые обжимают трубу с четырех сторон и с началом вращения гусеницы тянут трубу (примерная аналогия с гусеницей военного танка). В режиме «тянуть» все отлично работает, а в режиме генерации мощности, когда вес трубы за бортом больше, чем усилие между теншенером и барабаном, существуют серьезные проблемы в настройке при использовании тяжелой трубы с весом в 640 кг на метр. Стандартный ПИД регулятор частотного преобразователя не получилось корректно настроить в таком режиме генерации мощности. Электромеханики судна программированием регулятора для нелинейной характеристики добились лишь некоторого улучшения. Зависимость скольжения электромотора от момента теоретически должна носить примерно линейный характер, однако на практике персонал судна столкнулся с кривой, которая похожа на перевёрнутую параболу. Все это происходит в режиме укладки трубы, когда при достижении глубины в 400 метров начинаются забросы и труба извивается, как змея, между барабаном и рампой. Положительный эффект дала попытка применения адаптивного регулятора с добавлением в блок коррекции П- и И- частей в зависимости от момента (тока) электродвигателя из тех соображений, что чем сильнее натянута труба между рампой и барабаном, тем выше частота ее собственных колебаний. Такое некоторое улучшение дало возможность продолжить укладку трубы. Дальнейшие попытки нормализовать процесс укладки трубы связаны с добавлением ещё блока коррекции для нелинейности скольжения от тока. Контроль процесса ведется по частоте вращения вала по энкодеру. Данные о частоте поля и токе, полученные с частотного преобразователя дают полностью нелинейную характеристику. Электромеханики, в качестве эксперимента, написали блок программы для регулятора, сделав ступенчатую коррекцию по трём уровням и ведут подготовку к испытаниям.

Все это происходит в режиме плановой прокладки трубопровода, который происходит под надзором заказчика и специалистов, проводящих расчеты. С их стороны присутствует жесткое требование продолжать работу по прокладке трубы но так, чтобы натяжение у неё изменялось не более, чем на 5% от уставки, так как в противном случае система неправильно поровняет ее при размотке.

Дальнейшие наблюдения за работой электротехнического комплекса при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов зафиксировали обменные колебания мощности (рис. 5). Такие колебания крайне негативно влияют на работу

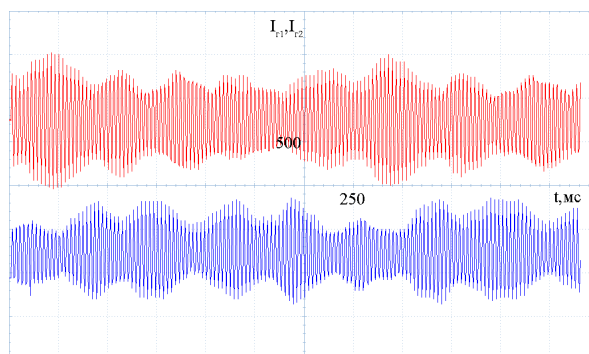


Рис.5. Обменные колебания мощности при параллельной работе генераторных агрегатов

Fig.5. Exchange power oscillations during parallel operation of generating sets

электрического оборудования и систем автоматики, в том числе задействованных в

прокладке гибкого трубопровода для кабеля, осуществляемом судном «*Seven Vega*». Для обеспечения корректной работы натяжителей с выполнением всех требований по укладке трубопровода необходимо исключить наличие обменных колебаний мощности, либо уменьшить их амплитуду до минимальных значений, которые не оказывают влияние на работу электротехнического комплекса судна [13-15].

Обсуждение

В постоянно меняющемся политическом и экономическом ландшафте *Royal IHC* позволяет своим клиентам выполнять сложные проекты от уровня моря до дна океана в самых сложных морских условиях, являемся надежным поставщиком инновационного и эффективного оборудования, судов и услуг для рынков шельфовых, дноуглубительных и влажных горных работ. Имея богатую историю голландского судостроения с середины 17 века, компания обладает глубокими знаниями и опытом в области инженерии и производстве высокопроизводительных интегрированных судов и оборудования, а также предоставление устойчивых услуг. Из головного офиса в Нидерландах с 3000 сотрудников, работающих на площадках и в офисах по всему миру, компания может обеспечить локальное присутствие и поддержку на всех континентах. Операторы дноуглубительных работ, нефтегазовые корпорации, офшорные подрядчики, горнодобывающие компании и государственные органы во всем мире получают выгоду от высококачественных решений и услуг *IHC*. С приверженностью технологическим инновациям, в которых устойчивость и безопасность являются ключевыми, компания стремимся постоянно удовлетворять конкретные потребности каждого клиента в быстро меняющемся мире.

Subsea 7 - мировой лидер в области реализации морских проектов и услуг для развивающейся энергетической отрасли. Компания создает устойчивую ценность, являясь отраслевым партнером и предпочтительным работодателем в предоставлении эффективных офшорных решений, в которых нуждается мир. В *Subsea 7* работает более 11000 сотрудников из 80 разных национальностей, флот из более 30 судов и активное присутствие в 33 странах. У компании большой послужной список безопасной и надежной реализации проектов, а офшорные операции охватывают более пяти десятилетий и более 1000 проектов. Фил Саймонс, исполнительный вице-президент по проектам и операциям *Subsea 7*, сказал: «Мы рады добавить в наш флот «*Seven Vega*», одно из самых мощных и экономичных судов на рынке. Судно является важной долгосрочной инвестицией и устанавливает новый стандарт прокладки трубопроводов на море».

Сложность обеспечения работы таких судов, как кабелеукладчик «*Seven Vega*» состоит в уникальности его электротехнического комплекса. Отсутствие опыта в автономной эксплуатации судов с таким электрооборудованием требует постоянного принятия решений по обеспечению работы кабелеукладчика, а значит и нахождения на его борту высококвалифицированного персонала.

Сейчас обсуждается решение об установке на судне «*Seven Vega*» аккумуляторных батарей для покрытия пиковых нагрузок электротехнического комплекса. Дизель генераторы работают в параллель в некоторых режимах с нагрузкой в 20-25% для резерва, а после установки аккумуляторных батарей станет возможным работа одного дизель-генератора и батареи с инвертором в резерве. При таком режиме работы обменных колебаний мощности возникать не будет. Кроме того, можно будет заходить в Норвежские порты на аккумуляторных батареях. Ведь Норвегия постепенно запрещает заход на двигателях, если порт находится в городе. Иногда, даже если разрешен заход в порт на двигателях, для возможности стоянки необходимо только быстрое подключение берегового питания. В скором времени планируется запрет захода в порт с использованием дизельных двигателей.

Заключение

Суда специального назначения, выполняющие работы по прокладке трубопроводов и добыче нефти и газа, требуют установки на них оборудования для динамического позиционирования. В состав электротехнических комплексов таких судов непременно входят азимутальные винторулевые колонки на основе электрических двигателей и специальное оборудование для выполнения технологических операций по прокладке трубопроводов и бурения. Наблюдения и исследования, проведенные на кабелеукладчике «*Seven Vega*», обнаружили ряд проблем в работе судового электротехнического комплекса. Для их решения необходимо устранение обменных колебаний мощности при параллельной работе генераторных агрегатов. Поэтому, необходимо установить блок, воздействующий на настройки регуляторов частоты вращения дизель-генераторов во время их параллельной работы. Также необходимо оснащение судна аккумуляторными батареями для исключения параллельной работы генераторов в ряде режимов, а также для выполнения экологических требований при заходах и нахождении в европейских портах.

Особого внимания требуют системы управления натяжителями трубопроводов. Целесообразно обобщить накопленный опыт по настройке регуляторов, внести коррективы в программы их работы, расширить функциональные возможности. Это даст возможность электромеханическому персоналу оперативно реагировать на возникающие сложности и неисправности и обеспечить работу электротехнического комплекса судна.

Литература

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 93–100.
2. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017. V.108. 14002.
3. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017. 88(5). С. 253–258.
4. Губанов Ю.А., Калинин И. М., Корнев А.С., Кузнецов В. И., Сеньков А.П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019. №1-1(43). С.103–109.
5. Zhu, Sipeng., Ma, Zetai., Zhang, Ku., Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy. 2020. Т. 210.
6. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 3-4. С. 62–71.
7. Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109-114.
8. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews. 2020. Т. 120.
9. Geertsma, R. D.; Visser, K.; Negenborn, R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy. 2018 Т. 228.
10. Mondejar M.E., Andreasen J.G., Pierobon L., et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews. 2018. Т. 91.
11. Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. 2017. № 12. С. 18-23.
12. Савенко А.Е., Савенко П.С. Колебания мощности в единых судовых электроэнергетических системах с гребными электрическими установками. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23 № 5. С. .
13. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново. 2016. 172 с.
14. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.
15. Савенко А. Е., Савенко П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань, 2020. № 1. С. 136–144.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь. Email:Savenko-70@mail.ru.

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета, Керченский государственный морской технологический университет.

References

1. Khvatov OS, Tarpanov IA, Kuznecov PV. Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;3:93–100.
2. Dar'Enkov AB, Samoyavchev I, Khvatov OS, et al. *Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion*. MATEC Web of Conferences. 2017; 108:14002.
3. Sen'kov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, et al. *Ship unified electric-power systems*. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(5):253–258.
4. Gubanov YA, Kalinin IM, Kornev AS, et al. Directions of improvement for ship unified power systems. *Marine Intelligent Technology*. 2019;1-1(43):103–109.
5. Zhu Sipeng, Ma Zetai, Zhang Kun, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*. 2020, Book: 210, 118558, doi: 10.1016/j.energy.2020.118558.
6. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(3-4):62-71.
7. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2014;3-4:109-114. 3
8. Zhu Sipeng, Zhang Kun, Deng Kangyao. *A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles*. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Book: 120, 109611. doi: 10.1016/j.rser.2019.109611.
9. Geertsma RD, Visser K, Negenborn RR. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*. 2018. Book:228. pp. 2490-2509, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.
10. Mondejar ME, Andreasen JG, Pierobon L, et al. *A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications*. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, Book: 91, pp:126-151. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
11. Batrak DV, Kalinin IM, Kuznetsov VI, et al. Assessment of supply-voltage quality in a ship's electric-power system by means of computer simulation. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(12):788-794.
12. Savenko AE, Savenko PS. Power oscillations in unified shipboard electrical power systems with electrical propulsion systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5).
13. Savenko AE, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina*. Ivanovo, 2016. 172 p.
14. Savenko AE, Savenko PS. *Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing*. *Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering*, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.
15. Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):136-144.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University. E-mail:Savenko-70@mail.ru.

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University.

Получено

08.12.2021 г.

Отредактировано

13.12.2021 г.

Принято

14.12.2021 г.



ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКОЙ

Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А.

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ижевск, Россия
nebelll@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Асинхронные электродвигатели являются основными потребителями электрической энергии. Повышение их энергетических характеристик может способствовать значительному снижению электропотребления в целом. Использование в асинхронном двигателе совмещённой 12-зонной обмотки, вместо стандартной 6-зонной, теоретически может привести к снижению электрических потерь в обмотке статора, а также к снижению добавочных потерь, вызванных высшими пространственными гармониками. Основной целью работы является оценка влияния применения совмещённой обмотки статора на энергетические характеристики асинхронного двигателя. МЕТОДЫ. Исследование проводилось на двух электродвигателях АИР71В4, в одном из которых была уложена стандартная обмотка, а в другом совмещённая. В опыте к двигателям подводилось номинальное напряжение, а нагрузка осуществлялась с помощью электромагнитного нагрузочного устройства. Двигатели испытывались в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной. Проводимый опыт имел пятикратную повторяемость. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе приводятся зависимости силы тока, потребляемой активной и реактивной мощности, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от нагрузки двигателя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования показали, что асинхронный двигатель с совмещённой обмоткой на всём исследуемом интервале нагрузок имеет меньшее потребление как активной, так и реактивной мощности, по сравнению с двигателем со стандартной обмоткой, при этом коэффициенты мощности данных двигателей практически не отличаются. Наибольшая разница в коэффициентах полезного действия наблюдалась при нагрузках ниже номинальной в пользу усовершенствованной модели двигателя, но и при номинальной нагрузке двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим КПД на 3,1%.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель; совмещённая обмотка; энергетические характеристики; энергоэффективность.

Для цитирования: Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 109-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.

ESTIMATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A COMBINED WINDING

KV Martynov, LA Panteleeva, IA Blagodatskih

Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia
nebelll@bk.ru,

Absrtact: PURPOSE. Asynchronous motors are the main consumers of the electrical energy. Increasing their energy performance can contribute to a significant reduction in energy consumption in general. Using a combined 12-zone winding instead of the standard 6-zone one theoretically can lead to a decrease in electrical losses in the stator winding of the asynchronous motor and to reduce additional losses caused by the higher spatial harmonics. The main purpose of the work is to assess the effect of using a combined winding stator on the energy characteristics of the induction motor. METHODS. The study was performed on two AIR71V4 electric motors, one of which had a standard winding and the other had a combined winding. In the experiment, the engines were rated voltage, and the load was carried out using an electromagnetic loading

device. The engines were tested in the range of loads from idle to the nominal. The experiment was performed five times. **RESULTS.** The work under analysis shows the dependences of the current strength, consumed active and reactive power, efficiency, and power factor from engine load. **CONCLUSION.** The results of the study showed that an asynchronous motor with the combined winding over the entire investigated range of loads has a lower consumption of both active and reactive power, compared to a motor with a standard winding, while the power factors of these motors are practically the same. The greatest difference in efficiency was observed at loads lower than the nominal in favor of an improved engine model, but also at rated load, the motor with a combined winding has the higher efficiency of 3,1%.

Keywords: asynchronous electric motor; combined winding; energy characteristics; energy efficiency.

For citation: Martynov KV, Panteleeva LA, Blagodatskih IA. Estimation of energy characteristics of the asynchronous motor with a combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6):109-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.

Введение

Ежегодное наращивание производственных мощностей сопровождается увеличением потребления электроэнергии, а учитывая повсеместный рост тарифов на электроэнергию и повышение стоимости электрооборудования вопрос энергосбережения, является весьма актуальным [1].

Основными потребителями электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве являются асинхронные электродвигатели, на их долю приходится около 70-75% от всего энергопотребления [2, 3]. Повышение энергетических характеристик данных двигателей способно привести к значительному снижению затрат электрической энергии в целом по энергосистеме.

Асинхронные электродвигатели обладают высокой надёжностью, однако на её показатели влияют множество факторов, которые могут приводить к возрастанию вероятности отказа [4], из-за чего двигатели выводятся в капитальный ремонт с дальнейшей заменой обмотки. При этом после капитального ремонта может происходить снижение энергетических характеристик электродвигателей [5]. Вследствие этого целесообразно применять способы и методы, способствующие улучшению энергетических характеристик асинхронных двигателей, которые возможно осуществить не только при их изготовлении, но и при их ремонте.

Одним из таких возможных направлений повышения КПД и коэффициента мощности электродвигателя является использование в нём совмещённой 12-зонной обмотки статора, взамен стандартной 6-зонной. Совмещённая обмотка состоит из двух трёхфазных обмоток, в одной из которых фазы соединены по схеме «звезда», а в другой по схеме «треугольник». Между собой они могут подключаться либо параллельно, либо последовательно (рис. 1).

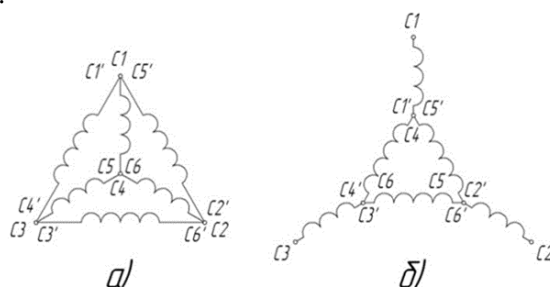


Рис. 1. Схемы соединения частей совмещённых обмоток: а) параллельное соединение; б) последовательное соединение

Fig. 1. Schemes for connecting parts of combined windings: a) parallel connection; b) serial connection

Совмещённая обмотка вызывает определённый исследовательский интерес не только в России, но и за рубежом [6-10]. В предыдущих работах были обоснованы некоторые преимущества совмещённых обмоток, такие как снижение относительного содержания высших пространственных гармоник [11-14] и эквивалентного активного сопротивления [15].

Известно, что высшие гармоники оказывают негативное влияние на работу двигателя: вызывают шум и вибрации, создают добавочные (тормозящие) моменты, дифференциальное рассеяние и добавочные потери. Добавочные потери по различным данным могут составлять от 0,4 до 6% от потребляемой машиной мощности [16, 17]. По этой причине снижение содержания высших гармоник в МДС обмотки может способствовать повышению энергетических характеристик двигателя.

Электрические потери в обмотке статора зависят от нагрузки двигателя и при номинальных условиях могут вносить наибольший вклад в сумму всех потерь. Так, например, для двигателя АИР71В4 их доля составляет около 55% [18].

Исходя из результатов предыдущих исследований [11-15], можно предположить, что применение в асинхронном двигателе совмещённой обмотки, вместо стандартной, позволит снизить электрические потери в статоре, а также добавочные потери, вызванные высшими гармониками.

Цель исследования – оценить влияние применения совмещённой обмотки в асинхронном электродвигателе на его энергетические характеристики.

Материалы и методы

Исследования проводились на двух асинхронных двигателях АИР71В4 с номинальной мощностью 0,75 кВт, в одном из которых была уложена стандартная 6-зонная равносекционная обмотка, а во втором совмещённая 12-зонная обмотка (рис. 2). Перемотка двигателей проводилась на ЗАО «Удмуртский электроремонтный завод».

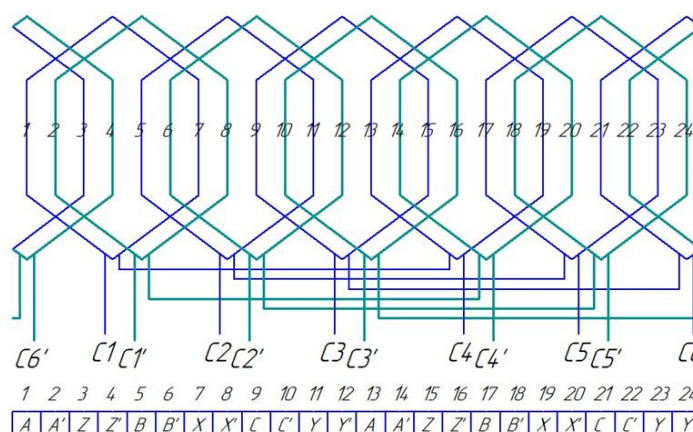


Рис. 2. Схема однослойной совмещённой 12-зонной обмотки экспериментального электродвигателя

Fig. 2. Scheme of a single-layer combined 12-zone winding of an experimental motor

В таблице 1 приведены некоторые обмоточные данные совмещённой обмотки экспериментального электродвигателя, полученные с помощью программы [19].

Таблица 1

Обмоточные данные экспериментального электродвигателя

	Фазы «звезды»	Фазы «треугольника»
Число витков фазы w	384	664
Число пазов, приходящихся на полюс и фазу q	1	1
Число эффективных проводников в пазу u_n	192	332
Диаметр проводника без изоляции d , мм	0,4	0,315
Число параллельных проводников в витке $n_{эл}$	1	1
Число параллельных ветвей a	1	1

Так как напряжение в сети может отличаться от своего номинального значения в течение дня, то для минимизации влияния этого фактора в исследованиях напряжение к двигателям подводилось от фазорегулятора, который выполнял функцию индукционного регулятора. Измерения значений силы тока I_l в линии, потребляемой активной мощности P_l

и величины питающего фазного напряжения U проводились с помощью комплекта измерительного К505. Электрическая схема лабораторной установки (рис. 3).

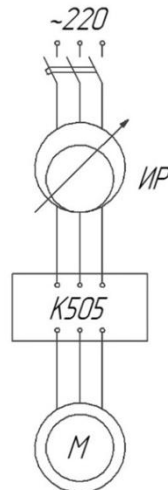


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки

Fig. 3. Electrical diagram of the experimental installation

Для создания тормозящего момента существуют различные варианты нагрузочных устройств. В исследование использовалось электромагнитное нагрузочное устройство, эскиз которого изображён на рисунке 4.

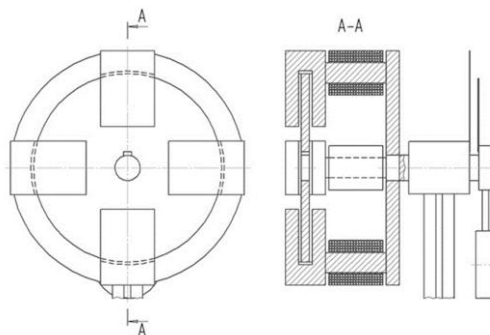


Рис. 4. Эскиз электромагнитного нагрузочного устройства

Fig. 4. Sketch of the electromagnetic loading device

Нагрузка данным устройством регулируется посредством изменения силы тока в его катушках, в результате этого изменяется величина магнитного потока и электромагнитная сила, действующая на диск устройства. Притом такая же сила начинает действовать на индуктор и отклонять его на некоторый угол, зависящий от массы противовеса и момента на валу. По углу отклонения определялся момент нагрузки M на валу двигателя:

$$M = m_e \cdot l \cdot g \cdot \sin \theta ,$$

где $m_e=5$ кг – масса груза противовеса;

$l=0,11$ м – длина плеча груза;

$g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

θ – угол отклонения противовеса нагрузочного устройства от положения равновесия.

Для определения частоты вращения двигателей использовался стрелочный тахометр часового типа ТЧ 10-Р.

Испытания проводились при следующих углах отклонения груза нагрузочного устройства: 0°; 10°; 20°; 25°; 30°; 35°; 40°; 45°; 55°; 75°, что соответствует моментам на валу двигателей: 0; 0,94; 1,84; 2,28; 2,70; 3,09; 3,46; 3,81; 4,42; 5,21 Н·м. Эксперимент имел пятикратную повторяемость. За показания токов, потребляемой активной мощности и частоты вращения принималось среднее арифметическое значение всех замеров:

$$X = \frac{\sum_{k=1}^5 X_k}{5} ,$$

где X_k – среднее значение измеряемой величины силы тока I_k , А, активной мощности P_{Ik} , Вт или частоты вращения n_k , об/мин в k -ом замере;

k – количество замеров.

В свою очередь значение каждого замера силы тока определялось, как среднее арифметическое трёх фаз:

$$I_k = \frac{I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}}{3},$$

где I_{Ak} , I_{Bk} , I_{Ck} – значения силы тока в фазе А, В и С при k -ом замере, А.

Значение потребляемой активной мощности вычислялось, как сумма мощностей по трём фазам:

$$P_{Ik} = P_{Ak} + P_{Bk} + P_{Ck},$$

где P_{Ak} , P_{Bk} , P_{Ck} – значения потребляемой активной мощности в фазе А, В и С при k -ом замере, Вт.

Значение напряжений в каждой фазе и каждом замере оставались постоянными. Угол отклонения противовеса нагрузочного устройства подбирался во всех замерах одинаковым. Полученные результаты экспериментов заносились в таблицу программы *Microsoft Excel*, где и проводилась их дальнейшая обработка.

Перед проведением испытаний под нагрузкой двигатель обкатывался на холостом ходу в течение 10 минут.

Результаты и обсуждения

В таблице 2 приведены среднеарифметические значения линейного тока, суммарной потребляемой активной мощности, момента на валу двигателя, частоты вращения и механической мощности, которые были получены в результате исследования двигателей со стандартной и совмещённой обмотками. Для краткости оформления в таблице 2 данные, относящиеся к стандартной обмотке, будем обозначать Y , а к совмещённой $Y\Delta$.

Таблица 2

Результаты измерений в опыте под нагрузкой

№	Электрические величины				Механические величины					
	Сила тока I_I , А		Потребляемая активная мощность P_I , Вт		Момент на валу двигателя M , Нм		Частота вращения ротора n , об/мин		Мощность на валу двигателя P_2 , Вт	
	Y	YΔ	Y	YΔ	Y	YΔ	Y	YΔ	Y	YΔ
1	1,63	1,53	169,2	145,0	0,00	0,00	1499	1499	0,0	0,0
2	1,60	1,47	313,3	285,0	0,94	0,94	1480	1482	145,0	145,2
3	1,63	1,51	450,0	421,7	1,84	1,84	1460	1463	281,8	282,5
4	1,67	1,55	525,0	488,3	2,28	2,28	1450	1454	345,9	346,7
5	1,71	1,59	595,0	561,7	2,70	2,70	1440	1444	406,4	407,4
6	1,75	1,66	656,7	630,0	3,09	3,09	1430	1435	462,9	464,5
7	1,80	1,72	725,0	695,0	3,46	3,46	1420	1425	515,2	517,0
8	1,87	1,79	788,3	760,0	3,81	3,81	1411	1415	563,1	564,7
9	2,00	1,93	913,3	880,0	4,42	4,42	1393	1397	643,9	646,0
10	2,21	2,13	1071,7	1030,0	5,21	5,21	1366	1371	744,5	747,4

Как видно из таблицы 2 в асинхронном двигателе с совмещённой обмоткой протекает меньший ток не только на холостом ходу, но также и при нагрузке. При нагрузке близкой к номинальной процентная разница токов составляет 3,77%. На рисунке 5 изображена зависимость тока обмотки статора от мощности на валу двигателя.

На рисунке 5 можем наблюдать, что у обоих двигателей происходит снижение тока статора при небольшой нагрузке, по сравнению с холостым ходом. Ток статора зависит от потребляемой двигателем полной мощности:

$$S = 3 \cdot U \cdot I = \sqrt{P_1^2 + Q^2}$$

где Q – реактивная мощность, потребляемая двигателем, вар.

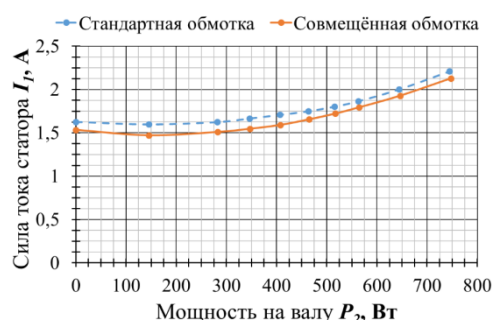


Рис. 5. Зависимость тока статора от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Fig. 5. Dependence of stator current on shaft power: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with a standard winding

Разобьём полную мощность на активную и реактивную составляющие. Результаты анализа представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица 3

Потребляемые мощности двигателей в испытании под нагрузкой

№	Полная мощность S, ВА		Активная мощность P ₁ , Вт		Реактивная мощность Q, вар		Процентная разница, %		
	Y	YΔ	Y	YΔ	Y	YΔ	ΔS	ΔP	ΔQ
1	1074,3	1012,9	169,2	145,0	1060,9	1002,5	5,72	14,29	5,51
2	1055,1	971,7	313,3	285,0	1007,5	928,9	7,91	9,04	7,80
3	1072,5	997,3	450,0	421,7	973,5	903,8	7,01	6,30	7,16
4	1100,0	1021,2	525,0	488,3	966,6	896,8	7,17	6,98	7,22
5	1127,5	1050,5	595,0	561,7	957,7	887,7	6,83	5,60	7,31
6	1155,0	1092,7	656,7	630,0	950,2	892,8	5,40	4,06	6,04
7	1189,8	1136,7	725,0	695,0	943,4	899,4	4,47	4,14	4,66
8	1232,0	1184,3	788,3	760,0	946,7	908,3	3,87	3,59	4,06
9	1321,8	1272,3	913,3	880,0	955,5	918,9	3,74	3,65	3,83
10	1459,3	1404,3	1071,7	1030,0	990,5	954,6	3,77	3,89	3,63

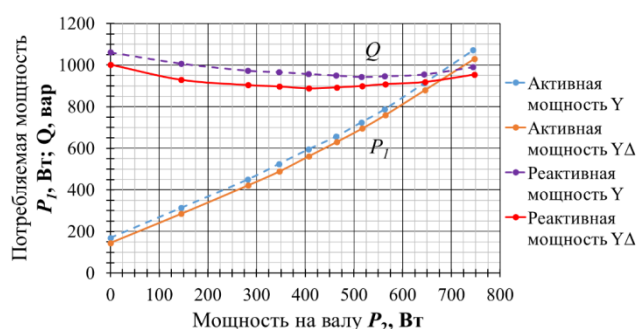


Рис. 6. Зависимость потребляемых активной и реактивной мощностей от нагрузки на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Fig. 6. Dependence of the consumed active and reactive power on the load on the shaft: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with a standard winding.

На рисунке 6 видно, что у обоих двигателей, по сравнению с холостым ходом, при низких нагрузках уменьшается потребление реактивной мощности, чем и объясняется уменьшения силы тока. Такое явление можно наблюдать в машинах малой мощности и, по всей видимости, причиной тому может являться уменьшение насыщения магнитопровода двигателя, вследствие небольшого снижения магнитной индукции. Однако с дальнейшим ростом нагрузки происходит увеличение магнитных потоков рассеяния, и потребляемая реактивная мощность вновь возрастает.

Оценим показатели энергоэффективности исследуемых асинхронных двигателей. К показателям энергоэффективности двигателей относят КПД и коэффициент мощности (отношение потребляемой активной мощности к полной). В исследовании к фазам

двигателей подводилось практически синусоидальной формы симметричное напряжение, в связи с этим коэффициент мощности K_m будет равен $\cos\varphi$. Результаты расчёта показателей энергоэффективности приведены в таблице 4, на рисунках 7 и 8.

Таблица 4

Показатели энергоэффективности двигателей в испытании под нагрузкой

№	КПД η , %		Коэффициент мощности K_m		Разность КПД $\Delta\eta$
	Y	Y Δ	Y	Y Δ	
1	0,0	0,0	0,157	0,143	0,0
2	46,3	51,0	0,297	0,293	4,7
3	62,6	67,0	0,420	0,423	4,4
4	65,9	71,0	0,477	0,478	5,1
5	68,3	72,5	0,528	0,535	4,2
6	70,5	73,7	0,569	0,577	3,2
7	71,1	74,4	0,609	0,611	3,3
8	71,4	74,3	0,640	0,642	2,9
9	70,5	73,4	0,691	0,692	2,9
10	69,5	72,6	0,734	0,733	3,1

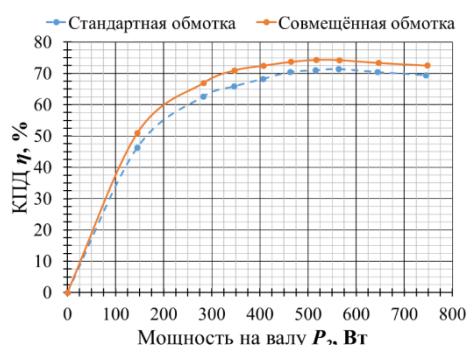


Рис. 7. Зависимость КПД от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Fig. 7. Dependence of efficiency on shaft power: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with a standard winding

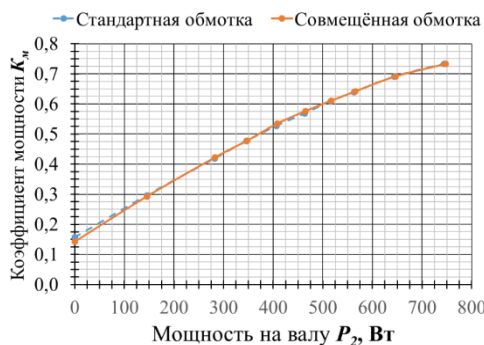


Рис. 8. Зависимость коэффициента мощности от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной обмоткой

Fig. 8. Dependence of power factor on shaft power: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with standard winding

По полученным графикам можно сказать, что асинхронный двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим КПД, чем двигатель со стандартной обмоткой на всём диапазоне рассматриваемых мощностей. Коэффициент мощности же у двух двигателей практически не отличается, при этом двигатель с совмещённой обмоткой потребляет меньше реактивной энергии, а отсутствие разницы в коэффициентах мощности объясняется снижением потерь.

Выводы

Результаты исследования показывают, что экспериментальная модель асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой обладает меньшими потерями мощности и меньшим потреблением реактивной энергии, чем аналогичный ему двигатель со стандартной обмоткой. При этом их коэффициенты мощности практически не отличаются.

КПД двигателя с совмещённой обмоткой выше, чем у двигателя со стандартной, притом наибольшая разность проявляется при его работе в недогруженном состоянии. Так при нагрузке двигателя в 46% от номинальной разность КПД составляет 5,1%, при номинальной же мощности выигрыш по КПД экспериментальной модели двигателя равняется 3,1%.

Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Валтчев С. Алгоритмы оценки эквивалентных сопротивлений внутризаводских электрических сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.
2. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С., Валтчев С., Грачева Е.И. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3. С. 116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
3. Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70
4. Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3. С. 80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89
5. Мугалимов Р.Г., Баранкова И.И., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Михайлова У.В., Никифоров Г.В. Техничко-экономическое обоснование целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №2. С. 101-109
6. Vansompel H., Sergeant P., DupreL., et al. A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines with Concentrated Windings // IEEE Trans. Energy Convers. 2012. N2.pp. 403-410.
7. Chen JY., Chen CZ. Investigation of a new AC electrical machine winding // IEE Proceedings - Electric Power Applications. 1998. N2.pp. 125-132.
8. Cistelecan MV., Ferreira FJTE., Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2010. N2.pp. 348-355.
9. Gwozdziwicz M., Gawron S. Application of star-delta mixed stator winding in synchronous machine, with permanent magnets on the rotor surface // Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędowi Pomiarow Elektrycznych. 2011. N65. pp. 55-63.
10. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung // Jahresbercht. 2010. pp. 76-82.
11. Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А. Совершенствование конструкции обмотки статора асинхронного двигателя // Вестник ВИЭСХ. 2017. №1(26). С. 5-12.
12. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии»; 03–06 апреля 2018 г., Челябинск. Троицк: Южно-Уральский ГАУ, 2018. С. 94-101.
13. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с распределённой совмещённой обмоткой // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства»; 13–16 февраля 2018 г., Ижевск. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2018. С. 151-156.
14. Носков В.А., Пантелеева Л.А., Мартынов К.В. Повышение эффективности обмоток машин переменного тока // Электротехника. 2018. №1. С. 39-43.
15. Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А. и др. Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре // АгроЭкоИнфо. 2020. №1(39). С. 18.
16. Бойко Е.П., Ганицев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения / Под редакцией В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. 488 с.

17. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Перевод с англ. под редакцией З. Г. Каганова. М.: Энергия, 1981. 352 с.
18. Ванурин В.Н. Статорные обмотки асинхронных машин. СПб.: Лань, 2014. 176 с.
19. Мартынов К.В., Носков В.А., Благодатских И.А. Программа перерасчёта обмотки статора машины переменного тока со стандартной 6-зонной на совмещённую 12-зонную. Программа для ЭВМ №2020662822. 28.10.2020, Бюл. № 11.

Авторы публикации

Мартынов Кирилл Владимирович – старший преподаватель кафедры «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Пантелеева Лариса Анатольевна – канд. техн. наук., доцент, заведующая кафедрой «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Благодатских Иван Александрович – учебный мастер кафедры «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

References

1. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM, Tabachnikova TV, Valtchev S. Algorithms for estimating equivalent resistances of in-plant electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.
2. Meshcheryakov VN, Sibirtsev DS, Valtchev S, Gracheva EI. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
3. Ivanova VR, Kiselev IN. Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
4. Romanova VV, Khromov SV, Suslov KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.
5. Mugalimov RG, Barankova II, Zakirova RA, Mugalimova AR, Mikhaylova UV, Nikiforov GV. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye tselesoobraznosti kapital'nogo remonta asinkhronnykh dvigateley s povysheniyem ikh energoeffektivnosti. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2017; 2:101-9.
6. Vansompel H., Sergeant P., Dupre L., et al. A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines with Concentrated Windings. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2012;2:403-10.
7. Chen JY., Chen CZ. Investigation of a new AC electrical machine winding. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 1998;2:125-32.
8. Cistelecan MV., Ferreira FJTE., Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010;2:348-55.
9. Gwozdziejewicz M., Gawron S. Application of star-delta mixed stator winding in synchronous machine, with permanent magnets on the rotor surface. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędowi Pomiarow Elektrycznych*. 2011;65:55-63.
10. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung. *Jahresbercht*. 2010;76-82.
11. Martynov KV., Noskov VA., Pantelееva LA. Sovershenstvovaniye konstruktssii obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya. *Vestnik VIESKH*. 2017;1(26):5-12.
12. Martynov KV., Noskov VA. Garmonicheskii analiz magneto dvizhushchey silya sinkhronnogo dvigatelya s sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Instituta agroinzhenierii «Razvitiye energosistem APK: perspektivnyy etekhnologii»*; 03–06 Apr 2018; Chelyabinsk, Russia. Troitsk: Yuzhno-Uralskiy GAU, 2018. pp. 94-101.
13. Martynov KV., Noskov VA. Garmonicheskii analiz magnitodvizhushchey sily asinkhronnogo dvigatelya s raspredelonnay sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyy etekhnologii dlya realizatsii programmy nauchno-tekhnicheskogo razvitiya selskogo khozyaystva»*; 13–16 Feb 2018, Izhevsk, Russia. Izhevsk: Izhevskaya GSKHA, 2018. pp. 151-156.

14. Noskov VA., Panteleeva LA., Martynov KV. Improving the Efficiency of Alternating-Current Machine Windings. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(1):32-35. – doi:10.3103/S106837121801011X.
15. Martynov KV., Noskov VA., Panteleeva LA. et al. Perspektivy primeneniya sovmeshchonnoy obmotki dlya snizheniya elektricheskikh poter v statore. *AgroEcoInfo*. 2020;1(39).
16. Boyko YeP, Ganitsev YuV, Kovalev YuM etc.; Petrov VM, Kravchik AE., editors. *Asinkhronnyye dvigateli obshchego naznacheniya*. Moscow: Energiya; 1980. (In Russ).
17. Heller B, Hamata V. *Harmonic field effects in induction machines*. Prague: Academy of Sciences; 1977.
18. Vanurin VN. *Statornyye obmotki asinkhronnykh mashin*. Saint Petersburg: Lan'. 2014.
19. Martynov KV., Noskov VA., Blagodatskikh IA. *Programma pereraschota obmotki statora mashiny peremennogo toka so standartnoy 6-zonnoy na sovmeshchonnuyu 12-zonnuyu*. Computer program №2020662822. 28.10.2020, Byul. № 11.

Authors of the publication

Kirill V. Martynov – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia. E-mail: nebelll@bk.ru

Larisa A. Panteleeva – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Ivan A. Blagodatskikh – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Получено

16.11.2021 г.

Отредактировано

22.11.2021 г.

Принято

26.11.2021 г.



АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛИ

Малёв¹ Н.А., Погодицкий¹ О.В., Чилиева¹ М.Р., Имамиев² А.Р.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов», г. Казань, Россия
maleev@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В современных системах управления различных промышленных агрегатов основой для автоматизации технологических процессов является электрический привод. Высокие требования к качеству процесса управления, надёжности и энергетической эффективности технологических процессов и промышленных агрегатов определяют постановку и решение научно-практических задач по разработке и созданию новых перспективных систем управления электроприводов (СУЭП), позволяющих сохранить требуемое качество функционирования в условиях влияния дестабилизирующих факторов. Данные факторы могут воздействовать на систему управления в виде внешних координатных возмущений и суммироваться с соответствующими сигналами замкнутой СУЭП, а также выражаться в форме параметрических возмущений, приводящих к неустойчивости параметров СУЭП в процессе эксплуатации. Возникает необходимость создания такой системы управления, которая позволит осуществить идентификацию параметров СУЭП за счет введения в структуру системы соответствующих алгоритмов идентификации. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся беспоскоковый градиентный метод адаптивной идентификации, реализованный средствами программной среды MatLab. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе рассматривается задача параметрической идентификации электропривода с двигателем постоянного тока на основе определения функций чувствительности. Показатель качества процесса идентификации выбран из условия обеспечения близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения при вариациях неустойчивых параметров. Для построения алгоритма параметрической идентификации используется инверсная модель исследуемой СУЭП, показателем качества является квадрат невязки, а идентифицируемым параметром – общий коэффициент передачи электропривода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Моделирование в программной среде MatLab показало высокую робастность разработанного алгоритма идентификации к параметрическим возмущениям, которые не оказывают влияния на установившееся значение идентифицируемого параметра. Предложенный в работе способ компенсации статического момента сопротивления электропривода позволил обеспечить также малую чувствительность алгоритма и к внешним возмущениям. Идентификация общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока осуществляется с погрешностью, не превышающей 0,5% в режиме реального времени в условиях влияния возмущений различной физической природы.

Ключевые слова: алгоритм; неустойчивые параметры; электропривод; инверсная модель; модель чувствительности; дополнительное движение; невязка.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Чилиева М.Р., Имамиев А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 119-133. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-119-133.

ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE DC ELECTRIC DRIVE USING THE INVERSE MODEL

NA. Malev¹, OV. Pogoditsky¹, MR. Chilyaeva¹, AR. Imamiev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of JSC «Grid Company» – «Directorate of facilities under construction»,
Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In modern control systems of various industrial units, the basis for the automation of technological processes is an electric drive. High requirements for the quality of the control process determine the formulation and solution of scientific and practical tasks for the development and creation of new promising control systems for electric drives (EDCS), allowing to maintain the required quality of functioning under the influence of destabilizing factors. These factors can affect the control system in the form of external disturbances and be summed up with the corresponding signals of the closed EDCS, and also be expressed in the form of parametric disturbances. The need arises to create such a control system that will allow for the identification of the parameters of the EDCS by introducing the appropriate identification algorithms into its structure. *METHODS.* When solving the problem, a search-free gradient method of adaptive identification was used, implemented by means of the MatLab software environment. *RESULTS.* The paper considers the problem of parametric identification of an electric drive with a DC motor based on the definition of sensitivity functions. Wherein to construct an algorithm for parametric identification, an inverse model of the studied EDCS is used, the quality indicator is the squared discrepancy, and the identifiable parameter is the overall transmission coefficient of the electric drive. *CONCLUSION.* Modeling in the MatLab software environment showed a high robustness of the developed identification algorithm to parametric disturbances that do not affect the steady-state value of the identified parameter. The proposed method for compensating the moment of resistance electric drive also made it possible to provide a low sensitivity algorithm to external disturbances. The identification of the overall transmission coefficient of a DC electric drive is carried out with an error not exceeding 0.5% in real time under the conditions of the influence of disturbances of various physical nature.

Keywords: *algorithm; unstable parameters; electric drive; inverse model; sensitivity model; additional motion; discrepancy.*

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Chilyaeva MR, Imamiev AR. Algorithm for parametric identification of the dc electric drive using the inverse model. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6):119-133. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-119-133.

Введение

Процесс эксплуатации систем управления электроприводов сопровождается, как правило, влиянием дестабилизирующих факторов, под действием которых изменяются параметры системы и, в свою очередь, показатели качества процесса управления [1 – 4]. В этой связи в современных перспективных СУЭП актуальным является применение автоматических систем идентификации, позволяющих вычислять оценки нестабильных параметров на этапе функционирования в режиме реального времени [5 – 7]. Способность системы изменять свои свойства при изменении совокупности параметров определяют её параметрическую чувствительность [8, 9].

Условие нормального функционирования СУЭП можно сформулировать следующим образом: множество значений фазовых координат x , зависящих от вектора параметров СУЭП χ и вектора внешних воздействий f , которые реально могут иметь место в процессе функционирования СУЭП должно быть строго включено в множество значений x , при которых состояние СУЭП удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для выполнения данного условия необходимо предъявить к системе требование нулевой параметрической чувствительности или параметрической инвариантности $|x_{\chi, f}| = 0$, что практически неосуществимо [10, 11]. Поэтому требование параметрической инвариантности выражается в форме ε -чувствительности $|x_{\chi, f}| \leq \varepsilon$, которое означает, что принятый показатель качества функционирования СУЭП J находится в заданных пределах $J_{\min} \leq J \leq J_{\max}$. Одним из методов обеспечения ограничений на показатель качества является выбор номинальных значений компонент вектора параметров СУЭП χ с учётом технологических отклонений в процессе серийного производства [12]. В настоящей работе определение экстремального значения показателя качества J осуществляется аналитическим путем в сочетании с градиентным способом идентификации.

Методы

Показатели качества функционирования СУЭП могут быть различными. В инженерной практике широко применяются показатели, основанные на невязке [13]

$$\varepsilon(t) = y_o(t) - y_m(t), \quad (1)$$

формируемой как разность между действительным $y_o(t)$ и эталонным $y_m(t)$ значениями выходной координаты СУЭП. Относительная простота реализации алгоритма идентификации параметров СУЭП обеспечивается при показателе качества функционирования [14, 15]

$$J = \varepsilon^2(t) \quad (2)$$

или в векторно-матричной форме

$$J = (Y_o - Y_m)^T (Y_o - Y_m). \quad (3)$$

Рассмотрим математическую постановку задачи идентификации вектора параметров χ на основе выражения (3). Пусть собственное движение электропривода описывается выражением

$$\dot{x} = F(x, \chi, t). \quad (4)$$

Тогда дополнительное движение от вариаций вектора параметров СУЭП запишется с помощью соотношения

$$\Delta x = F(\Delta \chi). \quad (5)$$

Для получения оценки вектора $\hat{\chi}$ решается обратная задача, которой соответствует формальное отношение

$$\Delta \chi = F^{-1}(\Delta x). \quad (6)$$

Показатель качества (3) формируется следующим образом. Текущее значение вектора состояния СУЭП

$$x_o(\chi) = x_m + x_\chi \Delta \chi, \quad (7)$$

где x_m – требуемое значение вектора состояния модели СУЭП.

С учётом (7) показатель качества (3) для вектора промежуточных фазовых координат электропривода принимает вид

$$J = (\Delta x - x_\chi \Delta \chi)^T (\Delta x - x_\chi \Delta \chi), \quad (8)$$

где $\Delta x = x_o - x_m$.

Показатель качества (8) характеризует степень близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения [16, 17].

Определим оценку вектора $\hat{\chi}$, исходя из условия минимума критерия J . Преобразуем выражение показателя качества (8)

$$J = \Delta x^T \Delta x - \Delta \chi^T x_\chi^T \Delta x - \Delta x^T x_\chi \Delta \chi + \Delta \chi^T x_\chi^T x_\chi \Delta \chi$$

и продифференцируем полученное выражение по вектору $\Delta \chi$:

$$\frac{\partial J}{\partial (\Delta \chi)} = -x_\chi^T \Delta x - \Delta x^T x_\chi + 2 \Delta \chi^T x_\chi^T x_\chi. \quad (9)$$

Произведем в (9) матричные преобразования и приравняем данное выражение к нулю:

$$2 \Delta \chi^T x_\chi^T x_\chi = x_\chi^T \Delta x + \Delta x^T x_\chi. \quad (10)$$

Введём обозначения

$$P_1 = 2 x_\chi^T x_\chi \text{ и } P_2 = x_\chi^T \Delta x + \Delta x^T x_\chi. \quad (11)$$

С учётом введённых обозначений, из выражения (10) следует, что

$$P_1 \Delta \chi^T = P_2, \quad (12)$$

откуда вариация вектора параметров χ определяется по формуле

$$\Delta \chi^T = P_1^{-1} P_2. \quad (13)$$

При выполнении условия (13) оценка вектора параметров СУЭП находится из выражения

$$\hat{\chi} = \chi_m + \Delta \chi. \quad (14)$$

Матрицы P_1 и P_2 зависят от матрицы чувствительности x_χ . Поэтому для реализации выражения (13) в алгоритме идентификации параметров СУЭП необходимо предусмотреть вычислитель функций чувствительности [18, 19].

Объектом настоящего исследования является электропривод постоянного тока, получающий питание от управляемого выпрямителя и охваченный отрицательной обратной

связью по скорости. В качестве идентифицируемого параметра принят общий коэффициент передачи электропривода K .

Закон изменения идентифицируемого параметра

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J, \quad (15)$$

где $\nabla_k = \frac{\partial}{\partial K}$ – символ градиента; λ_k – коэффициент, характеризующий скорость идентификации параметра.

С учетом принятого показателя качества функционирования СУЭП (2) вычислим градиент

$$\nabla_k J = \frac{\partial [\varepsilon(t)]^2}{\partial K} = \frac{\partial [y_o(t) - y_m]^2}{\partial K} = 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K}. \quad (16)$$

Передаточную функцию электропривода в разомкнутой структуре можно представить дробно-рациональным выражением в операторной форме

$$W(s) = \frac{K \sum_{k=0}^m a_k s^k}{\sum_{k=0}^n b_k s^k} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0)}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (17)$$

где K – общий коэффициент передачи электропривода (добротность по скорости).

Передаточная функция замкнутой системы относительно сигнала ошибки

$$\Phi_{\Delta}(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{B(s)}{B(s) + KA(s)}. \quad (18)$$

Принимая за основу выражение (18), запишем передаточную функцию инверсной модели

$$\Phi_{\Delta}^{im}(s) = \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B(s) + KA(s)}{B(s)} = 1 + \frac{KA(s)}{B(s)}. \quad (19)$$

Дифференцируя (19) по общему коэффициенту передачи системы K , получим соответствующую функцию чувствительности передаточной функции инверсной модели

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{A(s)}{B(s)}, \quad (20)$$

которая не зависит от настраиваемого параметра, то есть функция чувствительности инвариантна к изменению K .

По выражениям (15) и (16) определим алгоритм беспоисковой градиентной идентификации

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J = -\lambda_k 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K(t)}. \quad (21)$$

Переходя к преобразованию Лапласа, получим

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial U_{im}(s)}{\partial K} \right] = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} \Delta U(s) \right], \quad (22)$$

и тогда, с учётом формулы (20), добротность по скорости найдём из выражения

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{A(s)}{B(s)} \Delta U(s) \right], \quad (23)$$

где $U_{in}(s)$ – входное задающее воздействие; $U_{im}(s)$ – выходной сигнал инверсной модели; $\Delta U(s)$ – сигнал рассогласования.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае роль эталонной модели выполняет инверсная модель, коэффициенты полиномов которой зависят от номинальных значений параметров электропривода за исключением добротности по скорости K , а невязка, соответственно, вычисляется по формуле

$$\varepsilon(t) = u_{in}(t) - u_{im}(t). \quad (24)$$

На основании полученных выражений структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода примет вид, показанный на рис. 1.

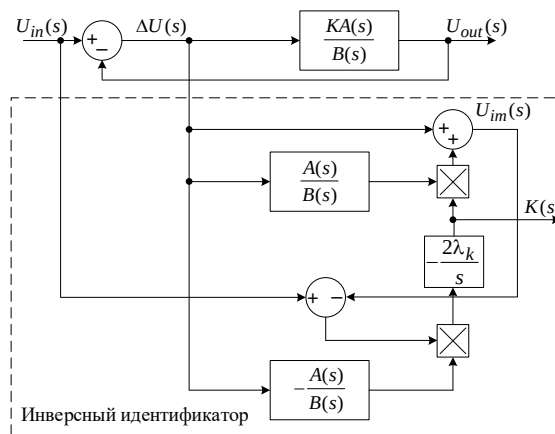


Рис. 1. Структурная схема динамической модели
инверсного идентификатора общего
коэффициента передачи электропривода

Fig. 1. Block diagram of the dynamic model of the inverse identifier of the total transmission coefficient of the electric drive

Результаты и обсуждение

В качестве электромеханического преобразователя в исследуемом электроприводе применен серводвигатель постоянного тока типа PIVT-6-25/3A с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 0,1 В·мин/об. Технические характеристики машины сведены в таблицу 1 [20].

Технические характеристики двигателя PIVT-6-25/3А.

Таблица 1

Номинальное напряжение U_a , В	Коэффициент передачи по моменту K_m , Н·м/А	Электромагнитная постоянная времени T_a , с	Электрохимическая постоянная времени T_m , с	Частота вращения при максимальном моменте n , об/мин	Максимальный момент M_{max} , Н·м
30	0,072	0,002	0,025	3000	0,225

Передаточная функция двигателя постоянного тока

$$W_m(s) = \frac{1/c}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1}, \quad (25)$$

где $c = K_m = 0,072 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$ – коэффициент противо-ЭДС.

Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа ВСА-5К с передаточной функцией

$$W_r(s) = \frac{K_r}{T_r s + 1}, \quad (26)$$

где $K_r = 15$ – коэффициент усиления выпрямителя; $T_r = 0,005$ с – постоянная времени выпрямителя [20].

На выходе тахогенератора установлен RC -фильтр для сглаживания пульсаций выходного напряжения с постоянной времени $T_f = 0,001$ с. Передаточная функция тахогенератора с фильтром

$$W_{\omega}(s) = \frac{K_{\omega}}{T_f s + 1}, \quad (27)$$

где $K_{\omega} = 0,0104 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ – коэффициент передачи тахогенератора, численно равный крутизне выходного напряжения [20].

Передаточная функция замкнутого электропривода относительно сигнала рассогласования

$$\begin{aligned}\Phi_{\Delta}(s) &= \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1+W_r(s)W_{em}(s)W_{\omega}(s)} = \\ &= \frac{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1) + K_r K_{em} K_{\omega}},\end{aligned}\quad (28)$$

где $K_{em} = 1/c = 13,89$ рад/В·с – коэффициент передачи двигателя.

Запишем добротность по скорости в виде произведения коэффициентов передачи всех элементов электропривода

$$K = K_r K_{em} K_{\omega} \quad (29)$$

и определим передаточную функцию инверсной модели:

$$\begin{aligned}\Phi_{\Delta}^{im}(s) &= \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{(T_r s + 1) \left(T_a T_m s^2 + T_m s + 1 \right) (T_f s + 1) + K}{(T_r s + 1) \left(T_a T_m s^2 + T_m s + 1 \right) (T_f s + 1)} = \\ &= 1 + \frac{K}{(T_r s + 1) \left(T_a T_m s^2 + T_m s + 1 \right) (T_f s + 1)}.\end{aligned}\quad (30)$$

Продифференцируем выражение (30) по общему коэффициенту передачи электропривода

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{1}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)} \quad (31)$$

и убедимся, что результат дифференцирования не зависит от идентифицируемого параметра, т.е. функция чувствительности инвариантна к изменению K (см. выражение (20)).

Структурная схема динамической модели идентификации общего коэффициента передачи исследуемого электропривода постоянного тока показана на рис. 2.

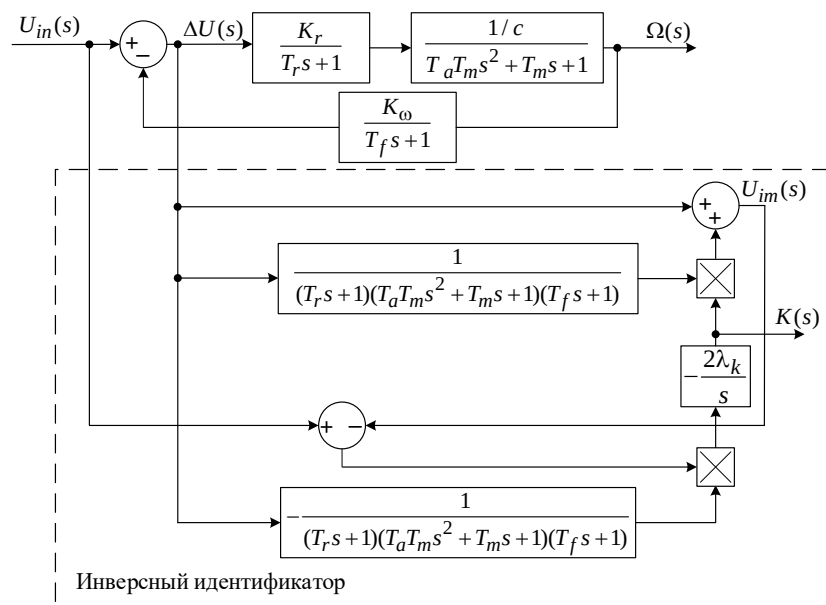


Рис. 2. Структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

На основании полученных выше выражений и схемы, показанной на рисунке 2, реализуем *Simulink*-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением программной среды *MatLab*. Соответствующая схема представлена на рисунке 3.

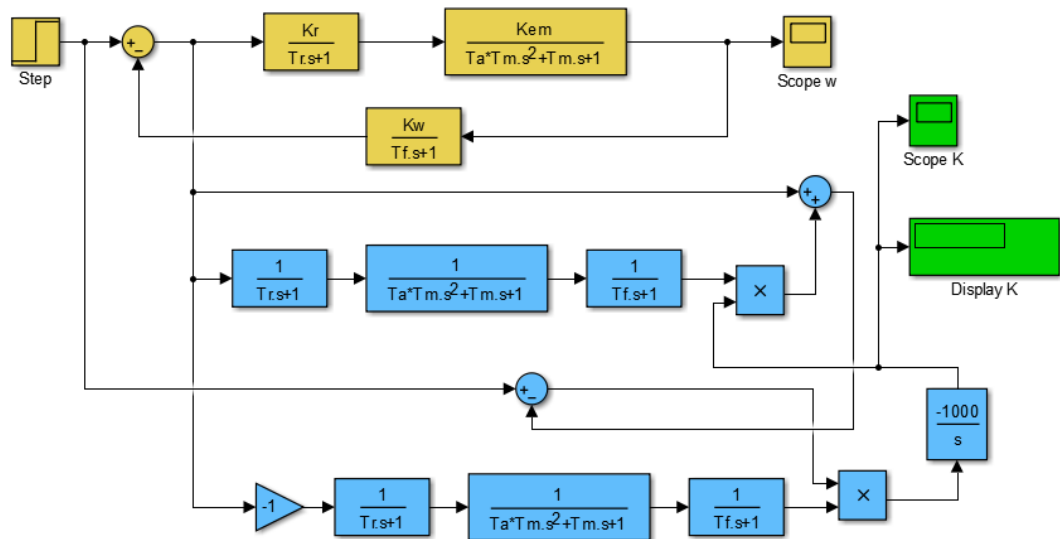


Рис. 3. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

Fig. 3. Simulink-model of the inverse identifier of the total transmission coefficient of a DC electric drive

На рисунке 3 блоки, выделенные жёлтым цветом, соответствуют исследуемой системе, блоки, выделенные голубым цветом, реализуют алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода согласно выражению (23), а блоки Scope K и Display K регистрируют и отображают идентифицируемый параметр.

В командное окно MatLab вводим значения параметров электропривода, соответствующие выражениям (25) – (27), характеризующие номинальный режим работы системы. Коэффициент, характеризующий скорость идентификации, принимаем $\lambda_k = 500$.

Результаты моделирования при номинальных значениях параметров представлены на рисунке 4.

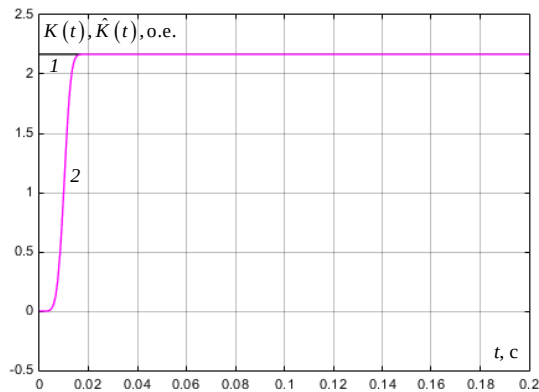


Рис. 4. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K: 1 – номинальное значение K(t); 2 – оценка $\hat{K}(t)$

Fig. 4. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K: 1 - nominal value K(t); 2 - evaluation

В соответствии с выражением (29) номинальное значение общего коэффициента передачи электропривода $K_{nom} = K_r K_{em} K_{\omega} = 15 \cdot 13,89 \cdot 0,0104 \approx 2,167$, при этом полученная оценка практически не отличается от номинального значения.

Дальнейшие исследования проведем при детерминированном изменении коэффициента K, а также при вариациях постоянных времени элементов электропривода. Результаты моделирования показаны на рисунках 5 и 6.

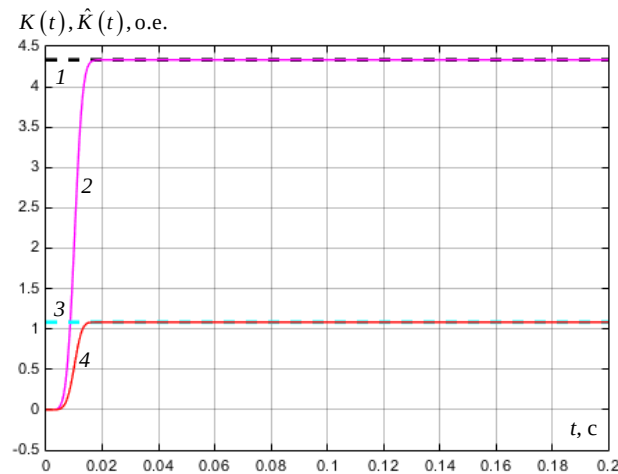


Рис. 5. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – значение $K = 2K_{nom}$; 2 – оценка $\hat{K}(t) = 2K_{nom}$; 3 – значение $K = 0,5K_{nom}$; 4 – оценка

Fig. 5. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K : 1 - value; 2 - estimate; 3 - value; 4 - estimate

Из анализа графиков, приведенных на рисунке 5 следует, что вычисление оценок общего коэффициента передачи электропривода при заданных изменениях K осуществляется с минимальным значением погрешности, не превышающем 0,001%, т.е. $\hat{K} \approx K$. При этом время, затрачиваемое на идентификацию, не превышает 0,02 с.

Произведем подобное исследование при изменении электромеханической постоянной времени машины постоянного тока T_m и постоянной времени фильтра T_f и $K = K_{nom}$ (см. рис. 6).

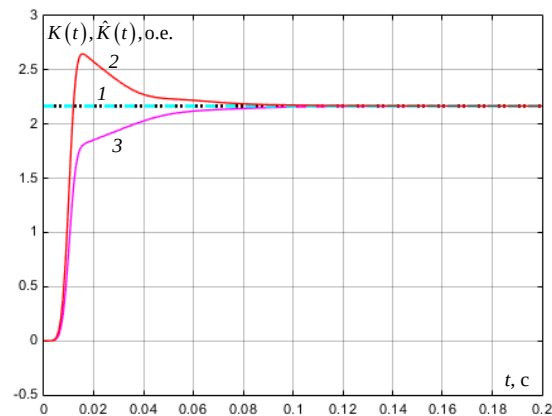


Рис. 6. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при уменьшении T_m и T_f на 20%; 3 – оценка $\hat{K}(t)$ при увеличении T_m и T_f на 20%

Fig. 6. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K : 1 - the nominal value of $K(t)$; 2 - an estimate with a decrease and by 20%; 3 - an estimate with an increase and by 20%

Вариации указанных постоянных времени в заданных пределах приводят к изменениям переходных процессов вычисления оценок общего коэффициента передачи электропривода, которые характеризуются снижением быстродействия и временем установления около 0,1 с как для случая с наличием перерегулирования (график 2), так и при монотонном процессе (график 3). При этом установившиеся значения вычисляемых оценок для обоих случаев соответствует номинальному значению коэффициента передачи.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемый в работе алгоритм идентификации является инвариантным к параметрическим возмущениям, обеспечивая

высокую точность процесса вычисления оценок общего коэффициента передачи исследуемого электропривода при сравнительно малых временных затратах.

Следует отметить, что функционирование электропривода в реальных условиях сопровождается внешними координатными возмущениями, к которым можно отнести момент сопротивления нагрузки M_c , а также шумы и наводки в цепях управления f . Структурная схема динамической модели исследуемого электропривода с учётом внешних возмущений представлена на рисунок 7 [21, 22].

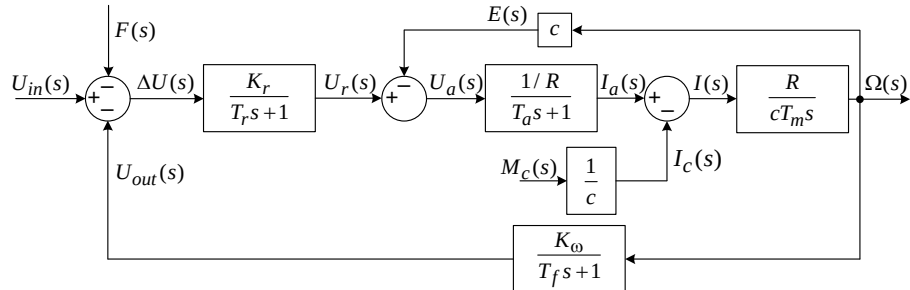


Рис. 7. Структурная схема динамической модели электропривода постоянного тока с учетом возмущающих воздействий.

Fig. 7. Block diagram of a dynamic model of a DC electric drive taking into account disturbing influences.

На основании показанной на рисунке 7 схемы сформируем *Simulink*-модель электропривода. Неизвестное сопротивление якорной цепи R было измерено с помощью измерительного моста постоянного тока типа ММВ с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$ [20]. Результаты измерения составили $R = 5,15$ Ом. Полученная *Simulink*-модель представлена на рисунке 8. Устанавливаем значение момента нагрузки $M_c = 0,8 M_{\max} = 0,8 \cdot 0,225 = 0,18$ Н·м, а сигнал шума зададим с помощью блока *Signal Generator*, выбирая во вкладке *Wave form* наименование сигнала *Random* и устанавливая амплитуду сигнала 0,3 В, частоту – 1 кГц.

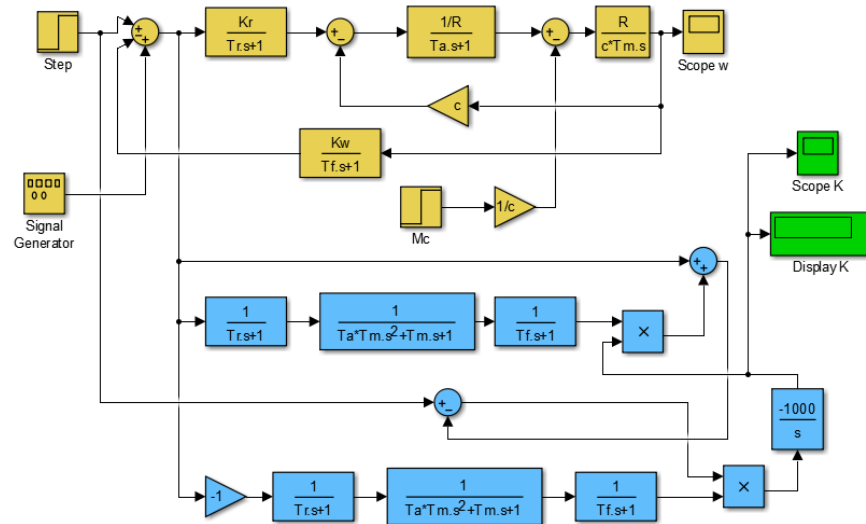


Рис. 8. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с учётом внешних возмущений

Fig. 8. Simulink-model of the inverse identifier of the total transmission coefficient of a DC electric drive taking into account external disturbances

Моделирование производим при набросе нагрузки через 0,1 с после пуска. Результаты вычисления оценки K представлены на рисунке 9.

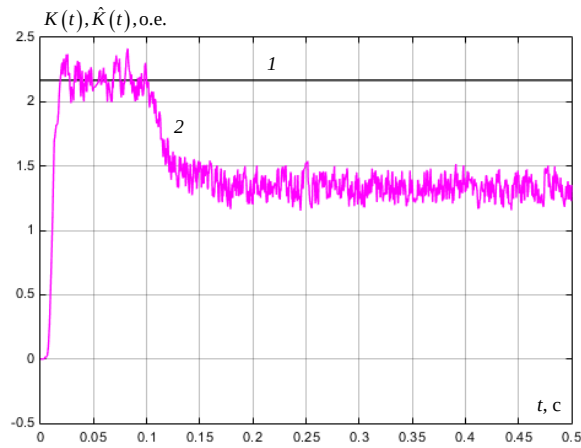


Рис. 9. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_C и f

Fig. 9. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K : 1 - nominal value $K(t)$; 2 - evaluation under the influence of external disturbances and f

Показанные на рисунке 9 зависимости иллюстрируют существенное влияние внешних возмущений на результат идентификации. Полученное в процессе вычисления значение $\hat{K}(t)$ сопровождается флуктуациями с амплитудой и частотой наведенной помехи f , что затрудняет определение установившегося значения K .

Влияние момента сопротивления M_C проявляется в значительном отклонении установившегося значения оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ от заданной величины K , вызванном перепадом скорости вращения электропривода под действием нагрузки. Данное влияние приводит к изменению сигнала рассогласования $\Delta U(s)$ и, в свою очередь, невязки $E(s)$ (24), в результате чего возникает погрешность результата идентификации общего коэффициента передачи K согласно формулы (23). Из рисунка 9 следует, что относительная погрешность вычисления $K = K_{nom} = 2,167$ при полученном значении оценки $\hat{K}_{уст}(t) = 1,352$ составляет около 37%, что говорит о неудовлетворительном решении. Максимальная погрешность идентификации обусловлена именно моментной составляющей ошибки, поскольку возмущающее воздействие f несущественно влияет на $\hat{K}_{уст}(t)$, а к ошибке по управлению рассматриваемая система инвариантна.

В целях снижения чувствительности алгоритма параметрической идентификации с применением инверсной модели к статическому моменту сопротивления нагрузки необходимо разработать способ определения M_C с последующим формированием корректирующего воздействия, компенсирующего влияние M_C и сводящего ошибку идентификации $\hat{K}(t)$ к минимуму. Запишем уравнение механического равновесия электропривода, выразив моменты через токи (см. схему на рис. 7):

$$i_a(t) - i_c(t) = i(t), \quad (32)$$

где $i_a(t)$ – ток якоря; $i_c(t)$ – ток, соответствующий моменту сопротивления;

$i(t) = \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}$ – ток, соответствующий динамическому моменту.

Из выражения (32) найдём

$$i_c(t) = i_a(t) - \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (33)$$

т.е. на основании информации о токе $i_a(t)$ с использованием датчика тока и об ускорении

$\frac{d\omega(t)}{dt}$ с использованием датчика скорости получим искомый сигнал, пропорциональный моменту сопротивления M_C .

Корректирующее воздействие, компенсирующее влияние M_C , формируется в виде сигнала напряжения

$$u_C(t) = k_C i_C(t), \quad (34)$$

где $k_C = 0,744$ Ом – коэффициент пропорциональности, подобранный путем компьютерного эксперимента. Невязка (24) становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_C)$. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_C представлена (рис. 10).

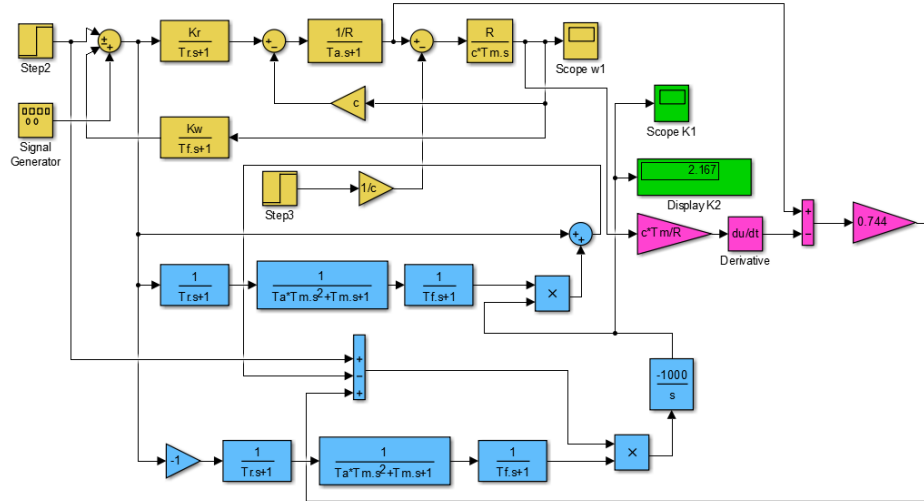


Рис. 10. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_C

Fig. 10. Simulink-model of the inverse identifier of the total transmission coefficient of a DC electric drive with compensation

На рисунке 10 блоки, выделенные сиреневым цветом, иллюстрируют процедуру формирования компенсирующего воздействия $u_C(t)$.

Компенсацию возмущающего воздействия f осуществим с помощью фильтра нижних частот первого порядка с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени, равной 0,012 с. Фильтрация осуществляется по отношению к сигналу рассогласования $\Delta U(s)$. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода показаны на рисунке 11.

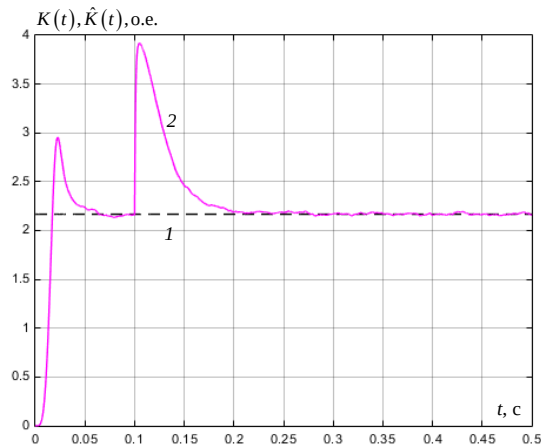


Рис. 11. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K с компенсацией возмущений M_C и f : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_C и f

Fig. 11. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K with compensation of disturbances and f : 1 - nominal value of $K(t)$; 2 - evaluation under the influence of external disturbances and f

График 2 на рисунке 11 характеризует динамические выбросы вначале процесса идентификации с перерегулированием 36% на 0,0225 с, а также при набросе нагрузки через 0,1 с от начала моделирования с амплитудой $\hat{K}_{\max}$ около 4 о.е. Процесс идентификации устанавливается примерно через 0,2 с и установившееся значение общего коэффициента передачи электропривода $\hat{K}_{уст} \approx K_{nom} = 2,167$. Флуктуации от возмущающего воздействия f благодаря фильтрации становятся незначительными и вносят пренебрежимо малую погрешность около 0,5 %. В этой связи можно считать, что предложенные выше решения позволили получить инвариантный как к параметрическим, так и к координатным возмущениям алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока.

Выводы

В настоящей статье проведены разработка и исследование алгоритма идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением инверсной модели, не зависящей от идентифицируемого параметра. Алгоритм реализован с применением градиентного метода вычисления интеграла от квадрата невязки с использованием в качестве эталонной модели объекта исследования инверсной модели, а также модели чувствительности по общему коэффициенту передачи электропривода K . Имитационное моделирование в программной среде *MatLab* показало, что разработанный алгоритм инвариантен к параметрическим возмущениям и изменение параметров исследуемого объекта, выраженных через постоянные времени элементов электропривода, не оказывает влияния на результат идентификации K , тогда как вариации коэффициентов передачи элементов электропривода, являющихся сомножителями K , идентифицируются в виде оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ с высокой точностью. При исследовании влияния координатных возмущений была выявлена высокая чувствительность алгоритма идентификации к данному виду возмущающих воздействий, причем максимальная погрешность вычисления оценки $\hat{K}(t)$ обусловлена моментной составляющей ошибки, которая алгебраически суммируется с сигналом рассогласования $\Delta u(t)$ и, соответственно, приводит к неконтролируемому изменению невязки $\varepsilon(t)$ и, в итоге, вычисляемой оценки $\hat{K}_{уст}(t)$. Для минимизации негативного влияния момента сопротивления M_c предложен способ формирования компенсирующего воздействия $u_c(t)$, полученного с применением датчиков тока якоря $i_a(t)$ и скорости вращения двигателя $\omega(t)$. В результате невязка становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_c)$ и сигнальная компенсация момента сопротивления обеспечивает определение установившегося значения общего коэффициента передачи электропривода $\hat{K}_{уст}(t)$ с погрешностью, не превышающей 0,5%. Влияние шумов и наводок не вносит существенной ошибки в результат идентификации и при необходимости может быть снижено путем фильтрации сигнала рассогласования $\Delta u(t)$ за счет применения фильтра нижних частот. Таким образом, разработанный алгоритм идентификации позволяет с высокой точностью за малые промежутки времени произвести оценку общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока в условиях текущей эксплуатации. Алгоритм не требует сложного измерительного оборудования и больших вычислительных мощностей и реализуется на основе стандартно применяемых в электроприводе датчиков. Процедура идентификации может быть автоматизирована путем получения соответствующего цифрового алгоритма и его реализации в виде рабочей программы микропроцессора. Результаты идентификации могут быть использованы как для анализа и контроля функционирования электропривода, так и для построения адаптивных параметрически инвариантных систем управления электроприводов с применением беспоисковых градиентных алгоритмов.

Литература

1. Calliess J., Roberts S.J., Rasmussen C.E., Maciejowski J. Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev N.A., Mukhametshin A.I. Pogoditsky O.V. and Mwaku W.M. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. V. 124. Доступно по: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.

3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes. In American Control Conference (ACC), 2013.

4. Saushev A.V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №5. V.327.

5. Deisenroth M.P., Fox D., and Rasmussen C.E. Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.

6. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования Q-таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 22(2). С. 86-97.

7. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. V. 24. No. 17. - P. 2774-2784.

8. Ostroverkhov M., Pyzhov V., Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017.

9. Кучер Е.С., Комазенко М.А., Ромащенко А.И. Синтез систем векторного управления малочувствительных к изменениям параметров асинхронного электропривода // Доклады академии наук высшей школы российской федерации. 2017. № 2(35). С.61-72.

10. Kovala I., Ivaniuk O., Vlach-Vyhyrnovska G., Stakhiv R. Параметрический синтез комбинированных автоматических систем регулирования с цифровыми пид-регуляторами // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2017. № 2(90). С.37-34.

11. Томчина О.П., Кондратова М.Е., Горохов М.М., Журов К.В. Адаптивный регулятор с нелинейной эталонной моделью // Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации. СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2017. С. 206-208.

12. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 21–26.

13. Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. Автомат. и телемех., 2017. № 4. С.92–105.

14. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers // Journal of Computer and System Sciences International. 2011. V. 50. 5. pp. 698-719.

15. Сольников Р.И., Каримов А.И., Каримов Т.И. Синтез цифровых регуляторов гироскопических командных приборов // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 1 (96).

16. Саушев А.В., Бова Е.В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т.11. № 2. С. 380-395.

17. Pshikhov V., Medvedev M., Kupovikh G., et al. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarcs), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018, 54–59.

18. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Загирова В.Н. Идентификация параметров и частоты вращения ротора асинхронного двигателя на основе функций чувствительности // Математические методы в технике и технологиях-ММТТ. 2020.Т.6. С.128-131.

19. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(6):101-110.

20. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(5):142-154.

21. Сташинов Ю.П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 // Электротехника. 2016. № 1. С. 2–7.

22. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – ст. преп. кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Чилыева Маргарита Романовна – студент, Казанский государственный энергетический университет.

Имадиев Айрат Рустемович – инженер группы сопровождения проектов КРис ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов».

References

1. J. Calliess SJ, Roberts CE, Rasmussen J, Maciejowski. Lazily Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV and Mwaku WM. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. V. 124. Available At: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. *Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes*. In American Control Conference (ACC), 2013.
4. Saushev AV. *Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;5:327.
5. M. P. Deisenroth, D. Fox, and C. E. Rasmussen. Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015.
6. Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):86-97.
7. Furtat I, Fradkov A. Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24:17:2774-2784.
8. Ostroverkhov M, Pyzhov V, Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017.
9. Kucher ES, Komazenko MA, Romashchenko AI. Synthesis of systems of vector control of induction motor drive parameters low-sensitive to changes. *Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*. 2017;2(35):61-72.
10. Kovela I, Ivaniuk O, Vlach-Vyhyrnyovska G, Stakhiv R. Parametric synthesis of combined automatic regulating systems with digital pid-controllers. *Eastern european journal of advanced technologies*. 2017;2(90):C.37-34.
11. Tomchina OP, Kondratova ME, Gorokhov MM, Zhurov KV. An adaptive controller with a nonlinear reference model – in the collection: Scientific achievements of modern science: novation, history, reality, prospects and implementation practice: Collection of scientific articles based on the results of an international scientific and practical conference. St. Petersburg: Publishing House «KultInform-Press», 2017. P. 206–208.
12. Anisimov AA. Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems. *Vestnik IGEU*. 2016;2:21–26.
13. Rutkovskii VYu., M. Glumov V. Dynamics peculiarities of an adaptive control system with nonlinear reference model. *Autom. Remote Control*. 2017;78:4:654–665.
14. Anisimov AA, Kotov DG, Tararykin SV. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2011;50(5):698 – 719.
15. Solnitsev RI., Karimov AI., Karimov TI.. Synthesis of digital regulators of gyroscopic command appliance. *Gyroscopy and navigation*. 2017;25(1):(96).

16. Saushev AV, Bova EV. The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov*. 2019;2:380-395.

17. Pshikhov V, Medvedev M, Kupovikh G, Shibakov V. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarsec), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018;54–59.

18. Afanasiev AY, Makarov VG, Zagirova VN. Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions. *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*. 2020;6:128-131.

19. Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):101-110.

20. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, Chichkov PV. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):142-154.

21. Stashinov YP. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Pt . Russian Electrical Engineering. 2016;1:2-7.

22. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. Modern problems of science and education. 2015;1. Pt 1:88.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University.

Margarita R. Chilyaeva – Kazan State Power Engineering University

Ayrat R. Imamiev – engineer of the projects support group for KRiS branch JSC «Grid Company» - «Directorate of facilities under construction».

Получено

07.04.2021 г.

Отредактировано

06.10.2021 г.

Принято

01.12.2021 г.



АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОМЕЩЕНИЙ ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ВСТРОЕННЫХ В ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.И. Федотов^{1,2}, А.Р. Ахметшин^{1,2}, В.И. Солуянов^{2,3}

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

³АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия

ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

ORCID⁵: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>, vs@tatem.ru

Резюме. ЦЕЛЬ. С помощью данных от интеллектуальных приборов учета электроэнергии проведен анализ профилей электрических нагрузок коммерческих организаций, входящих в состав многоквартирных домов. Выполнено сравнение полученных результатов с их действующими нормативными значениями. Рассмотрены новые значения удельных электрических нагрузок для помещений общественного назначения: аптек, продовольственных и промтоварных магазинов, предприятий общественного питания, офисных помещений. МЕТОДЫ. Получасовые профили нагрузки получены от интеллектуальных приборов учета электроэнергии, установленных непосредственно у исследуемых объектов, передача данных выполнялась автоматизированной системой учета электроэнергии. Интервалы наблюдения составляли несколько десятков дней. Для обработки экспериментально полученных данных применены статистические методы анализа электрических нагрузок. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, представлены профили электрических нагрузок помещений общественного назначения с выделением характерных признаков в отдельности по каждой группе потребителей электроэнергии. Рассмотрены новые удельные расчетные электрические нагрузки, в том числе произведен анализ по сопоставлению с существующими нормативами. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчетные значения электрической мощности с целью обеспечения технологического присоединения для помещений общественного назначения, включающих в себя социально-культурные объекты, необходимо актуализировать, так как на сегодняшний день существует значительная разница между фактической и рассчитанной по нормативным документам электрическими нагрузками. Актуализация удельных расчетных электрических нагрузок помещений общественного назначения позволит уменьшить запертую мощность, подходящую на данные объекты, одновременно сократить стоимость технологического присоединения, тем самым повысить рейтинг инвестиционного климата региона.

Ключевые слова: интеллектуальные приборы учета; удельные расчетные электрические нагрузки; электрические нагрузки помещений общественного назначения; запертая электрическая мощность; проектирование жилых комплексов.

Для цитирования: Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 137-147. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-137-147.

ANALYSIS OF ACTUAL ELECTRIC LOADS PUBLIC PREMISES, BUILT IN RESIDENTIAL BUILDINGS

YuI. Soluyanov^{1,2,3}, AI. Fedotov^{1,2}, AR. Akhmetshin^{1,2}, VI. Soluyanov^{2,3}

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

³JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia

ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

ORCID⁵: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>, vs@tatem.ru

Abstract: THE PURPOSE. With the help of data from smart electricity meters, an analysis of the profiles of electrical loads of commercial organizations that are part of apartment

buildings was carried out. The results obtained are compared with their current standard values. New values of specific electrical loads for public premises are considered: pharmacies, grocery and manufactured goods stores, catering establishments, office premises. **METHODS.** Half-hour load profiles were obtained from intelligent electricity metering devices installed directly at the objects under study, data transmission was carried out by an automated electricity metering system. The observation intervals were several tens of days. To process the experimentally obtained data, statistical methods for the analysis of electrical loads were used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, presents the profiles of electrical loads of public premises with the highlighting of characteristic features separately for each group of electricity consumers. New specific design electrical loads are considered, including an analysis in comparison with existing standards. **CONCLUSION.** The calculated values of electrical power in order to ensure technological connection for public premises, including social and cultural facilities, must be updated, since today there is a significant difference between the actual and calculated according to regulatory documents electrical loads. Updating the specific design electrical loads of public premises will reduce the locked capacity of these facilities, at the same time reduce the cost of technological connection, thereby increasing the rating of the investment climate in the region.

Keywords: smart meters; specific design electrical loads; electrical loads of public premises; locked electrical power; design of residential complexes.

For citation: Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Analysis of the actual electrical loads of public premises embedded in residential buildings. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6):137-147. doi: 10.30724 / 1998-9903-2021-23-6-137-147.

Введение

Важным направлением деятельности в области энерго- и ресурсосбережения является работа по совершенствованию соответствующей нормативной базы, что также соответствует поручению Президента Российской Федерации¹ (РФ). В частности, на сегодняшний день ведётся разработка новых нормативов для удельных электрических нагрузок жилых и общественных зданий на основе значений их реальных нагрузок [1,2]. Она базируется на возможности использования показаний, полученных от интеллектуальных счётчиков электроэнергии [3,4]. Ассоциация «Росэлектромонтаж» (далее Ассоциация) принимает в этой работе непосредственное участие.

Положительный опыт Ассоциации в актуализации нормативных значений удельных электрических нагрузок² для Республики Татарстан (РТ) [5,6], г. Москвы и Московской области в целях его распространения на все регионы РФ был поддержан заместителем Председателя Правительства РФ М.Ш. Хуснуллиным, Министром строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ И.Э. Файзуллиным.

Сегодняшние жилые комплексы невозможно представить не только без дошкольных образовательных (ДОУ) и среднеобразовательных учреждений (СОШ), но также без магазинов, аптек, предприятий общественного питания, офисных помещений и т.д. [7,8], которые в большей части располагаются в помещениях общественного назначения, встроенных (встроенно-пристроенных)³ (ПОН) в многоквартирные жилые дома (МКД) на первых двух этажах. Наличие внутри жилого комплекса ПОН повышает комфортность проживания граждан.

Проведенные исследования Ассоциацией в РТ [1, 2, 5] показали, что необходимо актуализировать существующие нормативные документы² для определения расчетной электрической нагрузки ПОН. Устаревшие нормативные документы² не отражают действительные электрические нагрузки, так как не учитывают изменения как количественного состава, так и электропотребление современных электроприборов.

За последнее десятилетие электропотребление бытовыми приборами за счет использования новых технологий изменилось в сторону уменьшения [9-11].

С 2023 г. показатели удельного расхода энергии на общедомовые нужды в МКД могут быть снижены на 40%⁴, а с 2028 г. на 50%⁴. Анализ возводимых жилых зданий г. Москвы за период с 2013 г. по 2020 г. показал динамику к увеличению количества

¹ Поручение Президента РФ от 25 мая 2020 г. № Пр-843 «О предложениях по оптимизации нормативных требований»

² СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»

³ СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003»

⁴ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17.11.2017 г. № 1550/пр «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений».

вводимых жилых домов с классом энергоэффективности⁵ А и В, что подразумевает снижение фактической мощности жилых зданий и в будущем [2, 9].

Отсутствие адекватных нормативных документов привело к снижению загрузки трансформаторов, образованию «запертой мощности» и увеличению в них относительных потерь [1, 12-14]. Свой вклад в образование «запертой мощности» вносят и объекты социального, культурного и бытового назначения. Как показывают расчеты [15], электропотребление ПОН может составлять от 10 до 68% общего электропотребления МКД. Доля «запертой мощности» растет одновременно с объектами социального, культурного и бытового назначения, расположенными в ПОН. Данная ситуация не устраивает ни строители, ни сетевые компании. В связи с этим по заданию АО «Сетевая компания» РТ Ассоциацией была выполнена научно-исследовательская работа в части рассмотрения возможности по актуализации удельных электрических нагрузок ПОН.

Выполнение работы по актуализации удельных электрических нагрузок встроенных в жилые здания ПОН в дополнении к снижению стоимости строительства и потерь электроэнергии также соответствует целям и задачам Государственной программы «Развитие энергетики»⁶, Энергетической стратегии⁷, в том числе повысит качество предоставления государственных услуг (присоединение к электрическим сетям), что приведет к повышению рейтинга инвестиционного климата региона⁸.

Состояние нормативно-правовой базы

Проблема, связанная с разницей между реальными и расчетными значениями электрической нагрузки, освещалась неоднократно в зарубежной и отечественной литературе [2, 8, 16-19]. Нередко в Ассоциацию поступали предложения по актуализации удельных электрических нагрузок от региональных застройщиков и сетевых организаций.

Объекты социальной, культурной и бытовой сферы в РТ занимают 11,8% в структуре электропотребления РТ⁹. Как правило, большая часть из них располагается в ПОН, встроенных (встроенно-пристроенных) в жилые дома¹⁰. В современных условиях, когда разрыв между фактическими и расчетными значениями электрической нагрузки увеличивается ввиду того, что нормативные значения¹¹ устарели, а электрические приборы становятся более энергоэффективными [20-23], актуальной задачей является корректировка нормативных документов в части расчетных удельных электрических нагрузок ПОН, встроенных в жилые здания, с обязательным пересмотром с периодичностью в 6-7 лет для своевременного снижения затрат при строительстве и эксплуатации электрических сетей [1, 2, 5].

Расчет электрических нагрузок общественных зданий допускается выполнять по укрупненным удельным электрическим нагрузкам [7, 9, 16, 24], приведенным в строительном своде правил¹¹ в таблице 7.14. «Укрупненные удельные электрические нагрузки». Также в строительном своде правил¹¹ существует возможность пересмотра расчетных данных, приведенных в таблице, которые могут корректироваться для конкретного применения с учетом местных условий. При наличии документированных и утвержденных в установленном порядке экспериментальных данных расчет нагрузок следует рассчитывать по ним.

Решению задачи по актуализации электрических нагрузок ПОН способствует цифровая трансформация в энергетике [25, 26], в частности переход на использование интеллектуальных счетчиков электроэнергии в совокупности с автоматизированной информационно-измерительной системой [27, 28]. Применение интеллектуальных систем учета электроэнергии позволяет выполнять расчеты по прогнозированию электрических нагрузок [11, 18, 23, 29, 30], осуществлять мониторинг качества электроэнергии [31, 32], выявлять неисправности электрооборудования, выявлять хищение электроэнергии [33] и т.д.

В рамках закона¹² введено понятие «интеллектуальной системы учета электрической энергии (мощности)», а также регламентируются правила организации учета электроэнергии на розничных рынках и в целях оказания коммунальных услуг по электроснабжению.

⁵ Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 06.06.2016 № 399/пр «Об утверждении правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов».

⁶ Государственная программа РФ «Развитие энергетики» в редакции от 31.07.2021 г. № 1294.

⁷ Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года от 9 июня 2020 г. № 1523 р.

⁸ Национальный рейтинг состояния инвестиционного климата в субъектах РФ.

⁹ Закона РТ от 06.08.2019 № 62-ЗРТ «О внесении изменения в Закон Республики Татарстан «Об утверждении Стратегии развития топливно-энергетического комплекса Республики Татарстан на период до 2030 года».

¹⁰ СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003».

¹¹ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

¹² Федеральный закон от 27.12.2018 N 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации»

Внедрение осуществляется в 4 этапа: 1 июля 2020 года – обслуживание и установка приборов учета становятся обязанностью сетевых / сбытовых компаний; 1 января 2021 года – новое строительство многоквартирного дома должно быть оснащено приборами учета, обеспечивающими возможность их включения к интеллектуальным системам учета электроэнергии; 1 января 2022 года – все приборы учета должны соответствовать минимальному функционалу¹³; 1 января 2023 года – потребители электрической энергии могут потребовать выплаты штрафа сетевыми / сбытовыми организациями потребителям, у которых не имеется удаленный доступ к минимальному набору функций интеллектуального учета.

Экспериментальные исследования электрических нагрузок ПОН

Анализ электрических нагрузок ПОН выполнен на основе предоставленных АО «Сетевая компания» получасовых профилей электрической нагрузки объектов социального, культурного и бытового назначения городов Казани и Бугульмы. Формирование профилей электрической мощности выполнялось счетчиками электрической энергии марки «Меркурий» и передавалось посредством информационно-измерительной системы «Пирамида», которая представляет собой территориально распределенную, многоуровневую систему. На её нижнем уровне расположены интеллектуальные счетчики электроэнергии, второй уровень занимают устройства сбора и передачи данных, к третьему уровню относятся серверы сбора, укомплектованные устройствами связи. На основе полученных данных в течение 2020 года выполнен сравнительный анализ профилей электрической нагрузки различных организаций, арендующих ПОН, как по характеру изменения, так и по величине максимальной нагрузки. На рисунке 1а представлено несколько профилей удельной электрической нагрузки аптек, снятых 14.09.20 г., на рисунке 1б – максимально зафиксированные удельные значения электрической нагрузки 15 аптек за 2020 г. В режимы нерабочих часов электрические нагрузки снижаются в 2-6 раз, рисунок 1а.

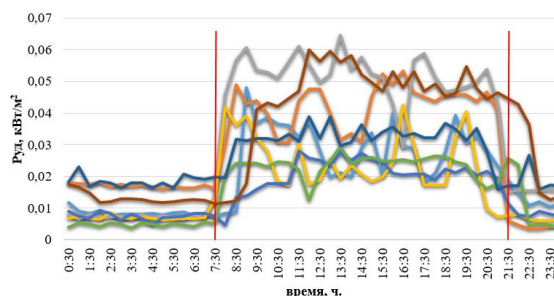


Рис. 1. Электрическая нагрузка аптек г. Казани и г. Бугульмы. а – получасовой профиль электрической нагрузки аптек, снятый 14.09.20 г.

Fig. 1 Electrical load of pharmacies in Kazan and Bugulma. a - half-hour profile of the electrical load of pharmacies taken on 14.09.20.

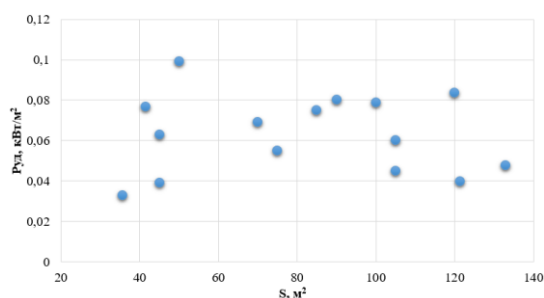


Рис.1.б – максимально зафиксированные значения электрической нагрузки аптек в течение 2020 г.

Fig.1.b - the maximum values of the electrical load of pharmacies during 2020.

Рисунок 1б иллюстрирует значительный разброс значений максимальной измеренной удельной нагрузки для небольших помещений, площадь которых не превышает 50 м². Несколько меньший разброс наблюдается для аптек большей площади. Уровень электрической нагрузки разный, что свидетельствует о разнородности

¹³ Постановление Правительства Российской Федерации от 19.06.2020 N 890 (ред. от 29.10.2021) «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)» (вместе с «Правилами предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)»).

используемых электроприборов. Важно отметить, что аптеки отсутствуют в нормативных документах, которые составлялись в период времени, когда аптек было на порядок меньше.

Максимальные зафиксированные значения удельной электрической нагрузки для всей выборки не превышают $0,099 \text{ кВт/м}^2$, рисунок 16, а для 94% выборки - $0,082 \text{ кВт/м}^2$. Для визуальной оценки величины и характеры разброса данных была построена гистограмма частот распределения [34, 35] удельных значений электрической нагрузки аптек, представленная на рисунке 2.

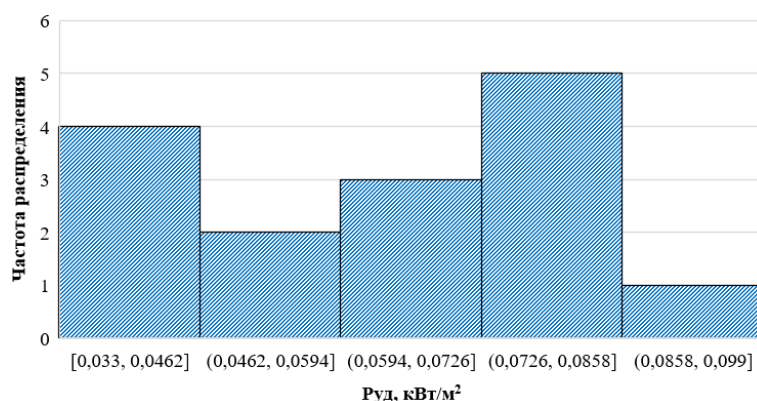


Рис. 2. Гистограмма распределения частот удельных значений электрической нагрузки аптек.

Fig. 2. Histogram of the distribution of frequencies of specific values of the electrical charge of pharmacies.

Результаты, представленные на рисунке 2, указывают на то, что чаще всего наблюдается удельная электрическая нагрузка от $0,0726$ до $0,0858 \text{ кВт/м}^2$. С целью исключения аварийных ситуаций рассматривается возможность принять значения удельной электрической нагрузки по максимально зафиксированному значению – $0,1 \text{ кВт/м}^2$.

На рисунке 3а представлены удельные профили электрической нагрузки магазинов, снятые 14.09.20 г., на рисунке 3б - максимально зафиксированные удельные значения электрической нагрузки 33 магазинов (10 - промтоварных и 23 - продовольственных магазинов) за 2020 г.

Представленные получасовые профили электрической нагрузки на рисунке 3а демонстрируют характерный график изменения, связанный с временем работы магазинов. Так как оснащённость электроприборами в магазинах разная, величина профиля электрической нагрузки отличается. Необходимо отметить, что разница между максимальным и минимальным режимами электропотребления не более 2 раз, свидетельствует о постоянно работающих электроприборах.

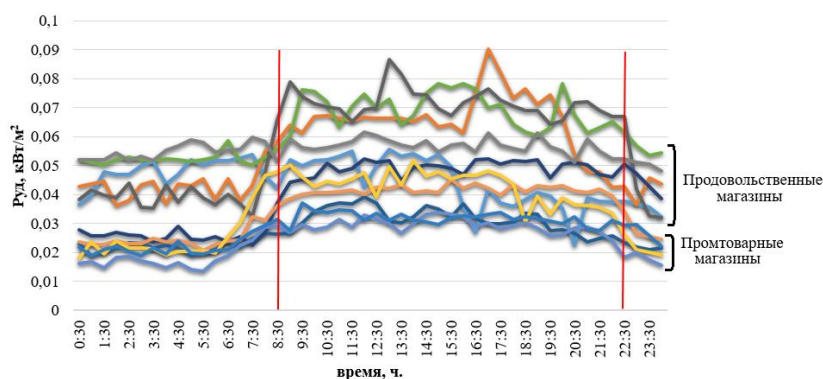


Рис. 3 Электрическая нагрузка магазинов г. Казани и г. Бугульмы. а – получасовой профиль электрической нагрузки магазинов, снятый 14.09.20 г.

Fig 3 Electrical load of shops in Kazan and Bugulma. а - half-hour profile of the electrical load of stores, taken on 14.09.20.

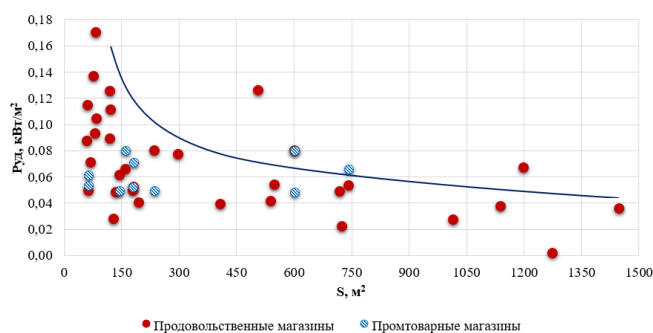


Рис 3 б – максимально зафиксированные значения электрической нагрузки магазинов в течение 2020 г.

Fig 3 b - the maximum recorded values of the electrical load of stores during 2020.

Максимальное удельное значение электрической нагрузки, зафиксированное за весь период наблюдения, составило $0,17 \text{ кВт/м}^2$, а для 97% выборки не превышает $0,14 \text{ кВт/м}^2$, рисунок 3б. Также наблюдается зависимость удельного значения электрической нагрузки от площади (чем больше площадь, тем меньше удельное значение электрической нагрузки). Гистограмма частоты распределения магазинов представлена на рисунке 4.

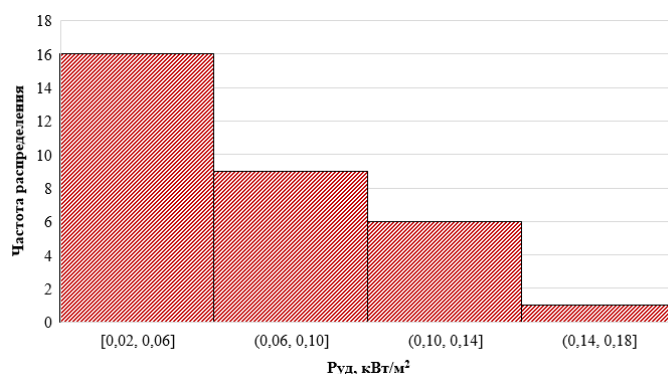


Рис. 4. Гистограмма частоты распределения удельных значений электрической нагрузки магазинов.

Fig. 4. Histogram of the distribution frequency of the specific values of the electrical load of stores.

Наиболее часто наблюдается удельная электрическая нагрузка до $0,06 \text{ кВт/м}^2$, рисунок 4. Максимальное значение удельной электрической нагрузки $0,17 \text{ кВт/м}^2$ считаем выбросом, а в качестве нового нормативного значения удельной электрической нагрузки рассматривается возможность принять $0,14 \text{ кВт/м}^2$ для продовольственных и $0,08 \text{ кВт/м}^2$ для промтоварных магазинов.

На рисунке 5а представлено несколько удельных профилей электрической нагрузки предприятий общественного питания, снятых 14.09.20 г., на рисунке 5б - максимально зафиксированные удельные значения электрической нагрузки 14 предприятий общественного питания за 2020 г.

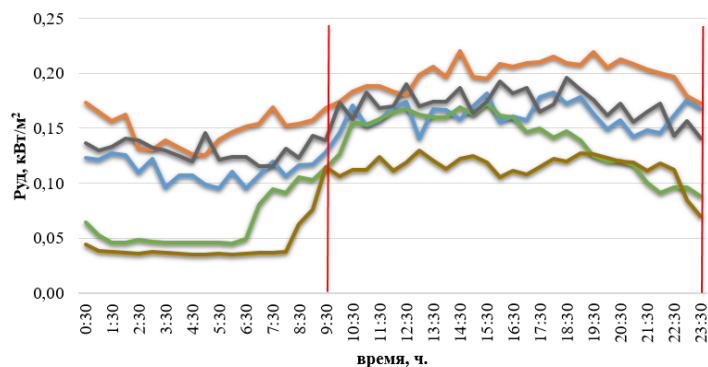
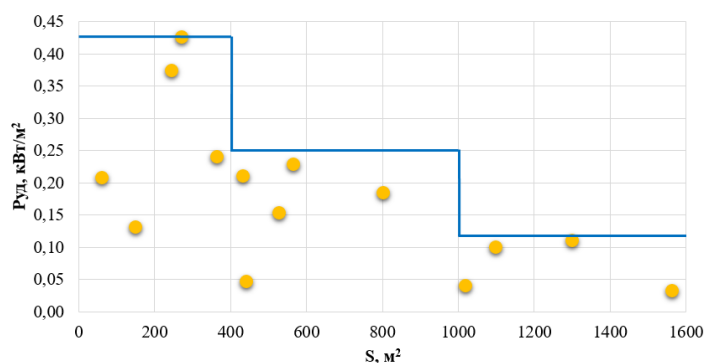


Рис. 5. Электрическая нагрузка предприятий общественного питания г. Казани и г. Бугульмы. а – получасовой профиль электрической нагрузки предприятий общественного питания, снятый 14.09.20 г.

Fig. 5. Electrical load of public catering establishments in Kazan and Bugulma. а - half-hour profile of the electrical load of public catering establishments, taken on 14.09.20.



б – максимально зафиксированные значения электрической нагрузки предприятий общественного питания в течение 2020 г.

b - the maximum recorded values of the electrical load of public catering establishments during 2020.

Получасовые профили электрической нагрузки предприятий общественного питания, представленные на рисунке 5а, демонстрируют характерный график изменения, связанного с временем работы предприятия общественного питания. Разница между максимальным и минимальным режимами электропотребления более 2 раз, свидетельствует о том, что электроприборы предприятия общественного питания используют только в часы работы этих организаций.

Максимальное удельное значение электрической нагрузки, зафиксированное за весь период наблюдения, составило 0,43 кВт/м², а для 80% выборки не превышает 0,25 кВт/м², рисунок 5б. Также как и для магазинов (рисунок 3б) наблюдается зависимость удельного значения электрической нагрузки от площади. Гистограмма частоты распределения нагрузки представлена на рисунке 6.

Рассмотрев гистограмму частоты распределения удельных значений электрической нагрузки предприятий общественного питания, рисунок 6, можно сделать вывод, что чаще всего фиксируется удельная электрическая нагрузка до 0,22 кВт/м². Предлагается рассмотреть введение нового нормативного значения удельной электрической нагрузки для предприятий общественного питания до 400 м² – 0,43 кВт/м²; от 400 до 1000 м² – 0,25 кВт/м²; свыше 1000 м² – 0,11 кВт/м², рисунок 5б.

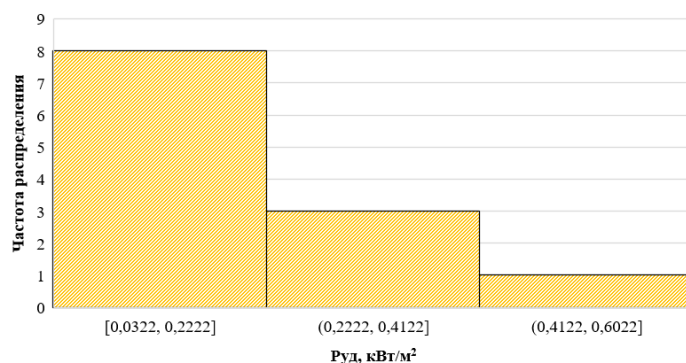


Рис. 6. Гистограмма частоты распределения удельных значений электрической нагрузки предприятий общественного питания.

Fig. 6. Histogram of the distribution frequency of the specific values of the electrical load of the public catering establishments.

На рисунке 7 а представлены удельные профили электрической нагрузки офисных помещений, снятые 14.09.20 г., на рисунке 7 б - максимально зафиксированные удельные значения электрической нагрузки 29 офисных помещений за 2020 г.

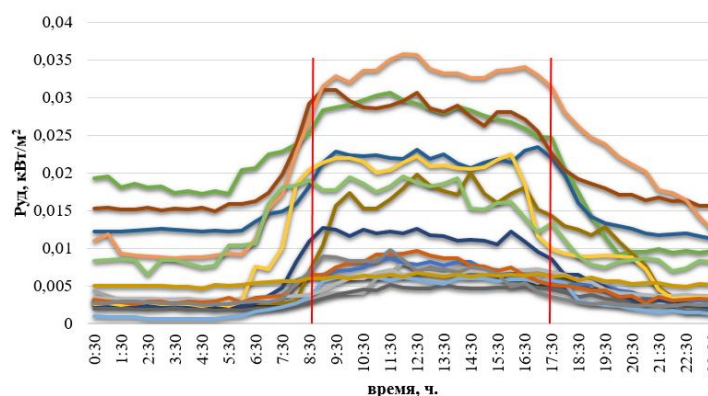
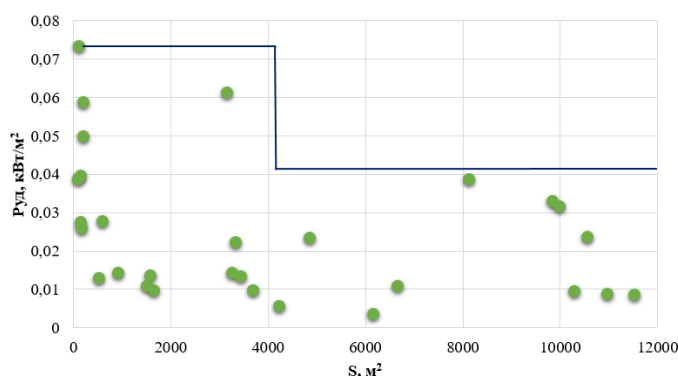


Рис. 7. Электрическая нагрузка офисных помещений г. Казани и г. Бугульмы а – получасовой профиль электрической нагрузки офисных помещений, снятый 14.09.20 г.

Fig. 7. Electrical load of office premises in Kazan and Bugulma a - half-hour profile of the electrical load of office premises, taken on 14.09.20.



б – максимально зафиксированные значения электрической нагрузки офисных помещений в течение 2020 г.

b - the maximum recorded values of the electrical load of office premises during 2020.

Представленные получасовые профили электрической нагрузки на рисунке 7а иллюстрируют характерный график изменения, связанный с временем работы офисных помещений. Разумеется, что в нерабочее время нагрузка снижается в разы, так как практически отсутствуют включенные электроприемники. Максимальное удельное значение электрической нагрузки, зафиксированное за весь период наблюдения офисных помещений, составило 0,073 кВт/м², что выше нормативных значений на 70% для офисных помещений без кондиционирования воздуха и на 35% с кондиционированием воздуха для помещений до 4000 м², рисунок 7б. Данный факт объясняется тем, что устаревшие нормативные документы¹⁴ не учитывали применения широкого спектра электроники для работы в офисных помещениях. Наблюдается зависимость электрической нагрузки от площади помещений офисов, рисунок 7б. В качестве нормативных значений рассматривается возможность введения 0,073 кВт/м² для офисных помещений до 4000 м² и 0,04 кВт/м² для офисных помещений свыше 4000 м². Гистограмма частоты распределения офисных помещений представлена на рисунке 8.

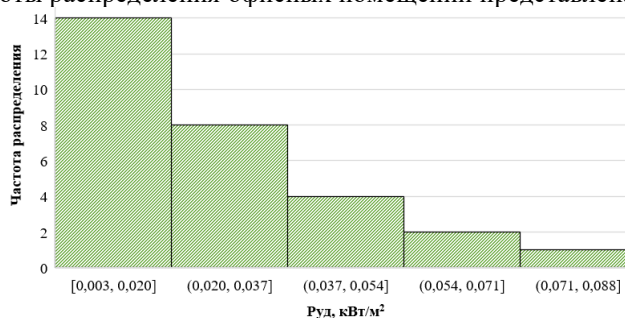


Рис. 8. Гистограмма частоты распределения удельных значений электрической нагрузки офисных помещений.

Fig. 8. Histogram of the distribution frequency of the specific values of the electrical load of office premises.

Удельная электрическая нагрузка до 0,02 кВт/м² была зафиксирована у большинства офисных помещений, рисунок 8.

Результаты

Анализ максимальных значений удельных электрических нагрузок показал, что существует значительная разница между реальными и расчетными нагрузками, записанными в строительном своде правил¹⁴. В таблице 1 приведены значения удельных электрических нагрузок, полученные при анализе максимально зафиксированных электрических нагрузок ПОН. На рисунке 9 представлена разница стоимости технологического присоединения по максимальной мощности в перерасчете на 1 м² между проанализированными и действующими нормативными значениями¹⁴.

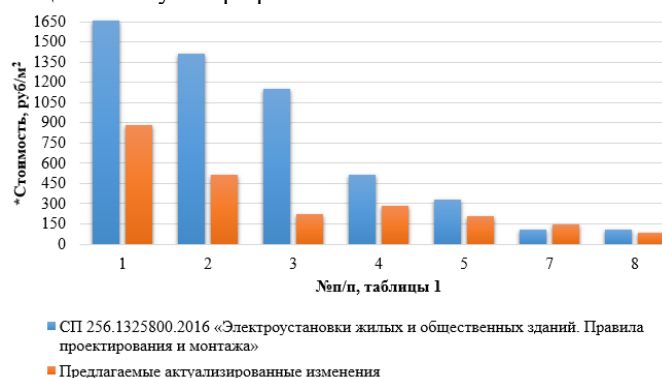
Таблица 1

Предлагаемые изменения в таблицу 7.14¹⁴ «Укрупненные удельные электрические нагрузки»

№ п/п	Характеристика здания	Единица измерения	Удельная нагрузка ¹⁴	Предлагаемые изменения
Предприятия общественного питания				
Частично электрифицированные (с плитами на газообразном топливе) с числом посадочных мест:				
1.	до 400	кВт/м ² общей площади*	0,81	0,43*
2.	св. 400 до 1000	кВт/м ² общей площади*	0,69	0,25*
3.	св. 1000	кВт/м ² общей площади*	0,56	0,11*
Продовольственные магазины				
4.	Без и с* кондиционированием воздуха	кВт/м ² торгового зала	0,23 и 0,25	0,14*
Промтоварные магазины				
5.	Без и с* кондиционированием воздуха	кВт/м ² торгового зала	0,14 и 0,16	0,08*
Аптеки*				
6.	Без и с кондиционированием воздуха*	кВт/м ² торгового зала*	-	0,1*
Здания или помещения учреждений управления, проектных и конструкторских организаций, включая офисные помещения*				
7.	Без и с* кондиционированием воздуха до 4 000 м ² *	кВт/м ² общей площади	0,043 и 0,054	0,073*
8.	Без и с* кондиционированием воздуха свыше 4 000 м ² *	кВт/м ² общей площади	0,043 и 0,054	0,04*

*предлагаемые изменения в нормативный документ

Стоимость технологического присоединения по максимальной мощности была определена с помощью калькулятора расчета стоимости АО «Сетевая компания»¹⁵.



*Ориентировочная стоимость договора технологического присоединения по максимальной мощности. Для предприятий общественного питания: 1 посадочное место было приравнено к 1 м² общей площади. Так как аптеки были введены впервые, экономическое сравнение по ним не проводилось.

Рис. 9. Стоимость технологического присоединения, руб/м² Fig. 9. Cost of technological connection, rub/m².

Рисунок 9 демонстрирует экономическую эффективность актуализации электрических нагрузок объектов социально-культурного назначения: аптек, продовольственных магазинов, предприятий общественного питания и офисных помещений с площадью свыше 4000 м².

¹⁴ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

¹⁵ <https://gridcom-rt.ru/potrebityam/tekhnologicheskoe-prisoedinenie/kalkulyator-rascheta-stoimosti/>.

Обсуждение

Размещая организации внутри жилых домов с целью повышения комфортности проживания населения, необходимо учитывать следующее: размещать их следует в специально спроектированных и построенных нежилых помещениях. Размещение коммерческих организаций в квартирах, расположенных на первых этажах МКД, в настоящее время в городах РТ нежелательно [15].

Научно-исследовательская работа, проводимая Ассоциацией [1, 2, 5, 9], свидетельствует о значительном расхождении реальных и расчетных значений, представленных в нормативных документах. Проведение такого рода научных исследований целесообразно и по спортивным комплексам, медицинским учреждениям, индивидуальным домам и т.д. с целью снижения запертой мощности и затрат на строительство и эксплуатацию.

Постоянно повышающийся класс энергопотребления приборов - это современный тренд [20], позволяющий сделать вывод о необходимости работы по актуализации нормативных удельных электрических значений, которая должна проводиться на постоянной основе с периодическим пересмотром нормативных документов раз в 5 лет [2, 9]. Помощь в решении данной задачи окажет повсеместное внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии¹⁶.

Выводы

1. Неотъемлемой частью большинства МКД является ПОН, включающие в себя объекты социально-культурного назначения. Расчет электрической мощности с целью обеспечения технологического присоединения для данных объектов необходимо актуализировать, так как на сегодняшний день существует значительная разница между фактической и расчетной электрическими нагрузками.

2. Актуализация удельных расчетных электрических нагрузок ПОН позволит уменьшить запертую мощность, приходящуюся на данные объекты, и одновременно сократить стоимость технологического присоединения, тем самым повысить рейтинг инвестиционного климата региона.

3. От времени работы ПОН зависит получасовой график электрических нагрузок и имеют одинаковую закономерность изменения по времени, напротив величина электрической нагрузки сильно отличается в зависимости от вида потребителей.

4. В связи с появлением новых потребителей, расположенных в ПОН МКД, таких как многофункциональные центры, бассейны, тренажерные клубы, станции сотовой связи, зарядные станции для автомобилей и т.д. следует продолжить исследования с целью корректировки нормативных документов.

5. Учитывая непрерывный процесс в совершенствовании электроэффективности электроприборов, важным является обеспечение мониторинга электрических нагрузок с целью своевременной актуализации нормативных документов.

Литература

1. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я., и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71.
2. Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. №1(23). С. 156-166.
3. Proedrou A. Comprehensive review of residential electricity load profile models // IEEE Access. 2021. V. 9. pp. 12114 – 12133.
4. Mansoor H., Rauf H., Mubashar M., et al. Past vector similarity for short term electrical load forecasting at the individual household level // IEEE Access. 2021. V. 9. pp. 42771-42785.
5. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Актуализация удельных электрических нагрузок дошкольных образовательных и общеобразовательных учреждений // Вестник Чувашского университета. 2021. №1. С. 134-145.
6. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R. Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 643. Article number 012051.
7. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Москва: ИД «ФОРУМ» ИНФРА-М, 2017. 416 с.

¹⁶ Федеральный закон от 27.12.2018 N 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации»

8. Надтока И.И., Павлов А.В., Новиков С.И. Проблемы расчета электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // Известия вузов. Электромеханика. 2013. №1. С. 136-139.
9. Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Soluyanov D.Y., et al. Experimental research of electrical loads in residential and public buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The International Conference on Advances in Energy Industry and Power Generation (AdvEnGen-2020). 2020. V. 860. Article number 012026.
10. Надтока И.И., Павлов А.В. Повышение точности расчета электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №2. С. 45-48.
11. Ashok K., Li D., Divan D., et al. Distribution transformer health monitoring using smart meter data // IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. 2020. Article number 9087641.
12. Carroll P., Murphy T., Hanley M., et al. Household classification using smart meter data // Journal of official statistics. 2018. V. 34. N1. pp. 1-25.
13. Воропай Н.И., Стычински З.А., Козлова Е.В., и др. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 84-90.
14. Гальперова Е.В., Мазурова О.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на электроэнергию в условиях неопределенности социально-экономического развития страны и конъюнктуры региональных энергетических рынков // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 3(60). С. 41-45.
15. Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. №3(23). С. 47-57.
16. Надтока И.И., Павлов А.В. Расчеты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №3. С. 36-39.
17. Albert A., Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. V. 28. Iss. 4. pp. 4019-4030.
18. Mai W., Chung C.Y., Wu T., et al. Electric load forecasting for large office building based on radial basis function neural network // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2014. article number 6939378.
19. Cembranel S.S., Lezama F., Soares J., et al. A short review on data mining techniques for electricity customers characterization // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia. 2019. pp. 194-199.
20. Жилкина Ю.В. Концепции интернета вещей как способ мотивации к энергосбережению // Электрические станции. 2020. № 2. С. 23-26.
21. Воропай Н.И., Ретанц К., Хэгер У., и др. Разработка инновационных технологий и средств для оценки и повышения гибкости современных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 1(64). С. 52-63.
22. Антонов Н.В., Евдокимов М.Ю., Чичеров Е.А. Проблемы в оценке региональной дифференциации потребления электроэнергии в бытовом секторе России // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2019. № 4. С. 53-71.
23. Ledva G.S., Mathieu J.L. Separating feeder demand into components using substation, feeder, and smart meter measurements // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. V. 11. Iss. 4. pp.3280-3290.
24. Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. Принципы построения модели энергетического хаба // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 3-12.
25. Майоров А.В. Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030 // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 2(13). С. 2-7.
26. Yao D., Wen M., Liang X., et al. Energy theft detection with energy privacy preservation in the smart grid // IEEE Internet of Things Journal. 2019. V. 6. Iss. 5. pp. 7659-7669.
27. Melhem F.Y., Grunder O., Hammoudan Z., et al. Energy management in electrical smart grid environment using robust optimization algorithm // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. Iss. 3. pp. 2714-2726.
28. Lin W., Wu D., Boulet B. Spatialoral residential short-term load forecasting via graph neural networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. V. 12. pp. 5373-53841.

29. Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №3(114). С. 85–94.

30. Илюшин П.В. Особенности учета параметров нагрузки при анализе переходных процессов в сетях с объектами распределенной генерации // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №6(51). С. 54-61.

31. Федотов А.И., Абдрахманов Р.С., Ахметшин А.Р. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2011. № 09-10. С. 40-45.

32. Latifi M., Sabzehgar R., Rasouli M. Reactive power compensation using plugged-in electric vehicles for an AC power grid // IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. pp. 4986-4991.

33. Peng Y., Yang Y., Xu Y., et al. Electricity theft detection in AMI based on clustering and local outlier factor // IEEE Access. 2021. V. 9. pp. 107250 – 107259.

34. James G., Witten D., Hastie T., et al. An introduction to statistical learning with Applications in R. 2nd ed. Cham. Springer. 2021. p. 612.

35. Гореева Н.М., Демидова Л.Н. Статистика. Москва: Изд.: Прометей, 2019. 496 с.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж», председатель технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий».

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова, Казанский государственный энергетический университет, главный специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанского государственного энергетического университета, ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Солуянов Владимир Иванович – главный инженер, КМУ-2 АО «Татэлектромонтаж», ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

References

1. Soluyanov YI, Fedotov AI, Galitskiy YY, et al. Updating the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Electricity*. 2021; 6:62-71.

2. Soluyanov YI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Energy-resource-saving effect in the power supply systems of residential complexes from the actualization of standards for electrical loads. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(1):156-166.

3. Proedrou A. Comprehensive review of residential electricity load profile models. *IEEE Access*. 2021;9:12114-12133.

4. Mansoor H, Rauf H, Mubashar M, et al. Past vector similarity for short term electrical load forecasting at the individual household level. *IEEE Access*. 2021;9:42771-42785.

5. Soluyanov YI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Actualization of specific electrical loads of preschool educational and general educational institutions. *Bulletin of the Chuvash University*. 2021;1:134-145.

6. Soluyanov YI, Fedotov AI, Ahmetshin AR. Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;643:012051.

7. Opoleva GN. *Ehlektronsnabzhenie promyshlennykh predpriyatii i gorodov*. Moscow: Publishing House FORUM INFRA-M; 2017;416.

8. Nadtoke II, Pavlov AV, Novikov SI. Problems of calculating electrical loads of municipal consumers in micro-districts of megapolises. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2013;1:136-139.

9. Soluyanov YI, Fedotov AI, Soluyanov DY, et al. Experimental research of electrical loads in residential and public buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering. The International Conference on Advances in Energy Industry and Power Generation (AdvEnGen-2020). 2020;860:012026.

10. Nadtoka II, Pavlov AV. Increasing the accuracy of calculating the electrical loads of apartment buildings with electric stoves. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical science*. 2015;2:45-48.

11. Ashok K, Li D, Divan D, et al. Distribution transformer health monitoring using smart meter data. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*. 2020;9087641.

12. Carroll P, Murphy T, Hanley M, et al. Household classification using smart meter data. *Journal of official statistics*. 2018;34(1):1-25.

13. Voropai NI, Stychinski ZA, Kozlova EV, et al. Optimization of daily load schedules for active consumers. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2014;1:84-90.

14. Galperova EV, Mazurova OV. Long-term forecasting of demand for electricity in the face of uncertainty in the socio-economic development of the country and the conjuncture of regional energy markets. *Elektroenergiya. Transmission and distribution*. 2020;60(3):41-45.

15. Soluyanov YI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Updating the specific electrical loads of public premises built into residential buildings. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(3):47-57.

16. Nadtoka II, Pavlov AV. Calculations of electrical loads in the residential part of apartment buildings with electric stoves based on the average loads of apartments. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2014;3:36-39.

17. Albert A, Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013;28(4):4019-4030.

18. Mai W, Chung CY, Wu T, et al. Electric load forecasting for large office building based on radial basis function neural network. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2014;6939378.

19. Cembranel SS, Lezama F, Soares J, et al. A short review on data mining techniques for electricity customers characterization. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia*. 2019;194-199.

20. Zhilkina YV. Concepts of the Internet of Things as a Motivation for Energy Saving. *Electric Power Plants*. 2020;2:23-26.

21. Voropai NI, Retants K, Hager U, et al. Development of innovative technologies and tools for assessing and increasing the flexibility of modern energy systems. *Electricity. Transmission and distribution*. 2021;64(1):52-63.

22. Antonov NV, Evdokimov MY, Chicherov EA. Problems in assessing regional differentiation of electricity consumption in the household sector of Russia. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2019;4:53-71.

23. Ledva GS, Mathieu JL. Separating feeder demand into components using substation, feeder, and smart meter measurements. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;11(4):3280-3290.

24. Gerasimov DO, Suslov KV, Ukolova EV. Principles of constructing a model of an energy hub. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2019;43(3):3-12.

25. Mayorov AV. Development of the system of operational and technological management of the power grid complex within the framework of the concept of digital transformation 2030. *Electricity. Transmission and distribution*. 2019;13(2):2-7.

26. Yao D, Wen M, Liang X, et al. Energy theft detection with energy privacy preservation in the smart grid. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019;6(5):7659-7669.

27. Melhem FY, Grunder O, Hammoudan Z, et al. Energy management in electrical smart grid environment using robust optimization algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018;54(3):2714-2726.

28. Lin W, Wu D, Boulet B. Spatialoral residential short-term load forecasting via graph neural networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021;12:5373-53841.

29. Loskutov AB, Loskutov AA, Zyrin DV. Development and research of a flexible intelligent medium voltage electrical network based on a hexagonal structure. *Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva*. 2016;114(3):85-94.

30. Ilyushin PV. Features of the account of load parameters in the analysis of transient processes in networks with distributed generation facilities. *Elektroenergiya. Transmission and distribution*. 2018;51(6):54-61.

31. Fedotov AI, Abdrakhmanov RS, Akhmetshin AR. Ensuring the standard voltage level in distribution networks of 0.4-10 kV using booster transformers. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2011;09-10:40-45.

32. Latifi M, Sabzehgar R, Rasouli M. Reactive power compensation using plugged-in electric vehicles for an AC power grid. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018;4986-4991.

33. Peng Y, Yang Y, Xu Y, et al. Electricity theft detection in AMI based on clustering and local outlier factor. *IEEE Access*. 2021;9:107250 - 107259.
34. James G, Witten D, Hastie T, et al. *An introduction to statistical learning with Applications in R*. 2nd ed. Cham. Springer. 2021;612.
35. Goreeva NM, Demidova LN. *Statistics*. Moscow: Publ.: Prometheus, 2019;496.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – Kazan State Power Engineering University, JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia Kazan, Russia, Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Vladimir I. Soluyanov – Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia, JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia.

Получено **04.12.2021 г.**

Отредактировано **06.12.2021 г.**

Принято **09.12.2021 г.**

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА ДЛИННОХОДОВОГО ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Татевосян А.А.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>, karo1@mail.ru

Резюме: В статье предложено решение задачи оптимизации конструкции магнитной системы тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в составе перспективного к использованию в компрессоростроении линейного привода одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения подвижной части. В качестве критерия оптимальности используется максимум КПД электромеханического преобразователя. Решением задачи оптимизации установлена в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями СДПМ. Приведено обоснование максимально возможного КПД СДПМ для синусоидального и несинусоидального законов движения индуктора. **ЦЕЛЬ:** Получение решения задачи оптимизации конструкции магнитной системы тихоходного СДПМ в составе линейного привода одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения подвижной части, удовлетворяющего критерию максимума КПД электромеханического преобразователя. **МЕТОДЫ:** Использовались методы теории электромеханических преобразователей энергии, теоретической электротехники, математического моделирования, методы оптимизации, вариационного, дифференциального и интегрального исчисления, а также экспериментальные методы. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** Приведены результаты экспериментального исследования разработанного макетного образца тихоходного СДПМ в составе линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Наибольший КПД СДПМ достигается, когда ток в обмотке якоря изменяется во времени прямо пропорционально скорости движения индуктора. Для обеспечения указанного режима предлагается использовать частотный преобразователь с открытым программным кодом, позволяющий реализовать временную зависимость тока в обмотке якоря в соответствии с заданным законом движения подвижной части. Управление СДПМ осуществляется частотным преобразователем на основе созданных в среде MexBios структурных моделей.

Ключевые слова: тихоходный двигатель возвратно-поступательного движения; постоянные магниты; длинноходовой одноступенчатый компрессор; система управления; частотный преобразователь.

Для цитирования: Татевосян А.А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 148-156. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF QUIET PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR LINEAR DRIVE OF LONG-STROKE SINGLE-STAGE PISTON COMPRESSOR

AA. Tatevosyan

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>, karo1@mail.ru

Abstract: The article proposes a solution to the problem of optimizing the magnetic system design of a low-speed synchronous motor with permanent magnets (PMSM) as a part of a linear drive of a single-stage piston compressor that is promising for use in compressor construction for a given

law of motion of the moving part. The maximum efficiency of the electromechanical converter is used as an optimality criterion. By solving the optimization problem, the relationship between the design parameters and the energy performance of the PMSM was established in an analytical form. The substantiation of the maximum possible efficiency of the PMSM for the sinusoidal and non-sinusoidal laws of motion of the inductor is given. **PURPOSE:** Obtaining a solution to the problem of optimizing the magnetic system design of a low-speed PMSM as a part of a linear drive of a single-stage reciprocating compressor for a given law of motion of the moving part that meets the criterion of maximum efficiency of an electromechanical converter. **METHODS:** The methods of the theory of electromechanical energy converters, theoretical electrical engineering, mathematical modeling, optimization methods, variational, differential and integral calculus, as well as experimental methods are used. **RESULTS:** The results of an experimental study of the developed prototype of a low-speed SDPM as a part of a linear drive of a long-stroke single-stage reciprocating compressor are presented. **CONCLUSION:** The highest efficiency of the PMSM is achieved when the current in the armature winding changes with time in direct proportion to the speed of the inductor. To ensure this mode, it is proposed to use an open-source frequency converter, which makes it possible to implement the time dependence of the current in the armature winding in accordance with the given law of motion of the moving part. The PMSM is controlled by a frequency converter based on structural models created in the MexBios environment.

Keywords: low-speed reciprocating motor, permanent magnets, long-stroke single-stage compressor, control system, frequency converter.

For citation: Tatevosyan AA. Optimization of parameters of quiet permanent magnet synchronous motor for linear drive of long-stroke single-stage piston compressor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):148-156. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.

Введение

Применение линейных электрических двигателей для привода поршневых компрессоров возвратно-поступательного действия является конкурентно способным по отношению к традиционно применяемому приводу гидравлической системы [1–4]. Преимуществом такого технического решения является снятие ограничений по эксплуатации в условиях работы низких температур, а также исключение требований к герметичности гидравлических соединений. Кроме этого, повышенный интерес представляют технические решения привода в отсутствие передаточных и преобразовательных механизмов, которые снижают КПД, повышают стоимость и уменьшают надежность электротехнического комплекса в целом [5]. Использование электрических тихоходных двигателей возвратно-поступательного движения, в котором подвижная часть жестко связана со штоком компрессора является актуальным направлением в области создания современных высокотехнологичных электротехнических комплексов [6, 7]. В настоящее время одним из актуальных направлений в области компрессорного машиностроения является разработка одноступенчатых длинноходовых компрессорных агрегатов, позволяющих получить средние и высокие значения давлений сжатого газа (до 20 МПа в одной ступени) [8, 9]. Для таких компрессоров представляет интерес разработка оптимальных конструкций тихоходных синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) возвратно-поступательного движения. Линейная зависимость развиваемого тягового усилия от тока в обмотке двигателя, реализация прецизионных цифровых систем управления делают применение СДПМ в качестве электромеханического преобразователя энергии в составе привода длинноходового одноступенчатого компрессора целесообразным и экономически привлекательным. Вместе с тем, многочисленные факторы, а именно: нелинейный характер пневматической системы компрессора в зависимости от степени сжатия газа, неравномерность магнитного поля в воздушном зазоре и другие оказывают влияние на энергетические параметры СДПМ, а многообразие конструктивных схем магнитной системы делают задачу разработки СДПМ во многом исследовательской, подчиненной выполнению жестких требований к выходным показателям компрессорной ступени [10, 11]. Ввиду развития микропроцессорной техники и повышения вычислительной мощности современных компьютеров задачи проектирования машин с постоянными магнитами целесообразно решать в программах, использующих полевые методы расчета магнитного поля [12].

Анализ существующих критериев оптимальности и методов оптимизации применительно к работе тихоходного СДПМ позволил выбрать в качестве критерия оптимальности максимум КПД электромеханического преобразователя при минимуме массы активных материалов. В качестве метода оптимизации применяется вариационный метод отыскания минимума функционала P_r^* , физический смысл которого есть относительные потери, связанные с КПД зависимостью $\eta = (1 + P_r^*)^{-1}$ [13, 14].

Теория

Математическая постановка задачи оптимального управления для ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора сводится к определению $i(t)$, $u(t)$, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу имеет вид:

$$\eta_{\partial} = \frac{\frac{\int_0^T C \vartheta(t) i(t) dt}{\int_0^T u(t) i(t) dt}}{\frac{\int_0^T C \vartheta(t) i(t) dt}{\int_0^T [R i^2(t) + C \vartheta(t) i(t)] dt}}; \quad (1)$$

при уравнениях связи

$$u(t) = i(t)R + u_L(t) + e_{\text{я}}(t); \quad u_L(t) = L_{\sigma} \frac{di(t)}{dt}; \quad e_{\text{я}}(t) = C \vartheta(t) \quad (2)$$

$$x(t) = X_0 + \sum_{v=1}^N [X_{vs} \sin(v\omega t) + X_{vc} \cos(v\omega t)]; \quad \vartheta(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (3)$$

ограничениях

$$|u(t)| < U_{\partial}; \quad 0 \leq x(t) \leq 2x_m \quad (4)$$

краевых условиях

$$i(0) = i(T), \quad (5)$$

где R - постоянное активное сопротивление обмотки якоря; L_{σ} - индуктивность рассеяния обмотки якоря; $x(t)$ - линейное перемещение индуктора в установившемся режиме есть несинусоидальная периодическая функция во времени, которую можно аппроксимировать рядом Фурье; x_m - половина хода индуктора (поршня); $e_{\text{я}}(t)$ - противо-ЭДС обмотки якоря, зависящая от скорости $\vartheta(t)$ движения индуктора; $C = B_{cp} \ell_{cp} k W_a$ - постоянная машины; B_{cp} - среднее значение магнитной индукции в межполюсном зазоре; W_a - число активных витков обмотки якоря; ℓ_{cp} - средняя длина витка обмотки якоря; k - коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; U_{∂} - максимально допустимое напряжение; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота; $f = 1/T$ - частота колебаний индуктора.

Отыскание оптимальной функции тока $i(t)$ в функционале (1) можно найти из условия минимума относительных потерь P_r^* . Поскольку $P_r^* = \frac{P_r}{P_{\text{мех}}}$ есть число, устанавливающее отношение электрических потерь P_r в двигателе к мощности $P_{\text{мех}}$, передаваемой в механическую подсистему, то введем его под знак интеграла

$$\frac{1}{T} \int_0^T [P_r^* C \vartheta(t) i(t) - R i^2(t)] dt = 0. \quad (6)$$

Важное практическое значение имеет решение задачи расчета эксплуатационных характеристик СДПМ при несинусоидальном ходе движения поршня тихоходной поршневой компрессорной ступени.

Используя уравнения (6), можно записать

$$P_r^* C i(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i^2(\omega t_k) R = 0 \quad (7)$$

Определим экстремум $\frac{dP_r^*}{d(\omega t_k)} = 0$

$$P_r^* [Ci'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + Ci(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)] - 2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R = 0 \quad (8)$$

откуда

$$P_r^* = \frac{2i(\omega t_k) i'(\omega t_k) R}{C [i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) + i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k)]}. \quad (9)$$

После подстановки выражения (9) в (7) получим уравнение для определения корня ωt_k

$$i'(\omega t_k) \dot{x}(\omega t_k) - i(\omega t_k) \ddot{x}(\omega t_k) = 0 \quad (10)$$

Решение уравнения (10) удовлетворяет условию резонанса механической системы ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, при котором электромагнитное усилие $F = Ci(t)$, действующее на поршень, опережает ход поршня компрессора на 90 эл. градусов, т.е. $i(t) = K\vartheta(t)$, где $K = const$.

Примем, что закон движения индуктора во времени является несинусоидальным и его можно разложить в ряд Фурье с конечным числом слагаемых, т.е.

$$x(t) = \sum_{v=1}^N [x_{vs} \sin(v\omega t) + x_{vc} \cos(v\omega t)] + x_0. \quad (11)$$

После подстановки выражений $i(\omega t_k) = K\dot{x}(\omega t_k) = K\vartheta(\omega t_k)$ и $i'(\omega t_k) = K\omega\ddot{x}(\omega t_k)$ в (9), получим

$$P_{r \min}^* = \frac{2K^2 \omega ABR}{2CK\omega AB}, \quad (12)$$

$$\text{где } A = \sum_{v=1}^n [\vartheta_{vs} \cos(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} \sin(v\omega t_k)], \quad B = \sum_{v=1}^n [-\vartheta_{vs} v \sin(v\omega t_k) - \vartheta_{vc} v \cos(v\omega t_k)].$$

Сокращая одинаковые сомножители в числителе и знаменателе дроби (12), минимально возможные относительные потери

$$P_{r \min}^* = \frac{KR}{C}. \quad (13)$$

Среднее значение механической мощности, поступающей в компрессор

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{T} \int_0^T Ci(t) \vartheta(t) dt = \frac{1}{2} CK \sum_{v=1}^N [\vartheta_{vs}^2 + \vartheta_{vc}^2] = CK\bar{\vartheta}^2 \quad (14)$$

где $\bar{\vartheta}$ - среднеквадратичное (действующее) значение скорости движения индуктора.

Для синусоидального закона движения ротора $x(t) = x_m(1 - \cos(\omega t))$ среднее значение механической мощности $P_{\text{мех}} = CK\bar{\vartheta}^2 = \frac{1}{2} I_m C x_m \omega$. Выполнив подстановку выражения для

коэффициента $K = \frac{I_m x_m \omega}{2\bar{\vartheta}^2}$ в формулу (13) и расчетных соотношений для постоянной машины, активного сопротивления обмотки и амплитуды тока, получим в явном виде минимально возможные относительные потери соответственно для несинусоидального и синусоидального закона движения индуктора СДПМ

$$P_{r \min}^* = \frac{\gamma_{np}^{-1} J_{\partial}}{\sqrt{2} B_{cp} k \bar{\vartheta}^2}, \quad P_{r \min}^* = \frac{\sqrt{2} \gamma_{np}^{-1} J_{\partial}}{B_{cp} k x_m \omega}, \quad (15)$$

где J_{∂} - максимально допустимая плотность тока; $\bar{\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1}^N [\bar{\vartheta}_{vs}^2 + \bar{\vartheta}_{vc}^2]}$ - действующее

значение скорости индуктора, выраженное в относительных единицах; $\bar{\vartheta}_{vs} = \frac{\vartheta_{vs}}{x_m \omega} = \frac{\vartheta_{vc}}{x_m}$,

$\bar{\vartheta}_{vc} = \frac{\vartheta_{vc}}{x_m \omega} = \frac{\vartheta_{vs}}{x_m}$ - относительные значения соответственно

амплитуд синусной и косинусной ν -ой гармоники скорости ротора;
 $\gamma_{np} = 56 \cdot 10^6 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ – удельная электропроводность меди.

Анализ выражения (15) определяет пути достижения максимально возможного КПД СДПМ в зависимости от закона движения индуктора во времени. На рисунке 1 приведены некоторые характерные законы $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ движения индуктора, которые можно аппроксимировать конечным числом (не менее трех) членов ряда Фурье, обеспечивающие заданную производительность компрессора. На рисунке 1 видно, что при использовании известных временных зависимостей кривая 1 близка к линейному закону $x(t)$ перемещения индуктора (поршня) от нуля до $2x_m$ за время прямого и от $2x_m$ до нуля обратного циклов работы компрессора, кривая 2 – близка к линейному закону скорости движения индуктора во времени при перемещении поршня от нуля до $2x_m$ и обратно, кривая 3 соответствует синусоидальному закону скорости движения индуктора во времени; кривая 4 – близка к предлагаемому закону скорости движения индуктора, учитывающего время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла при $P_{мех} = \text{const}$ и $x_m = \text{const}$, $f = 1 \text{ Гц}$
 $J_D = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, $B_{cp} = 0,5 \text{ Тл}$, $x_m = 0,1 \text{ м}$, $k = 0,85$.

Введение в выражение (14) плотности материала обмоточного провода $\gamma_{обм}$ позволяет вывести формулу для расчета необходимой массы активной части витков обмотки СДПМ, работающего с максимально возможным значением КПД, обеспечивающим заданное среднее значение механической мощности $P_{мех}$, поступающей в компрессор, или выраженную через максимальное значение электромагнитной силы, определяющей величину давления сжимаемого газа

$$m_{обм.акт} = \frac{\sqrt{2} P_{мех} \gamma_{обм}}{B_{cp} J_D k x_m \omega} = \frac{F_{эм.мах} \gamma_{обм}}{\sqrt{2} B_{cp} J_D k} \quad (16)$$

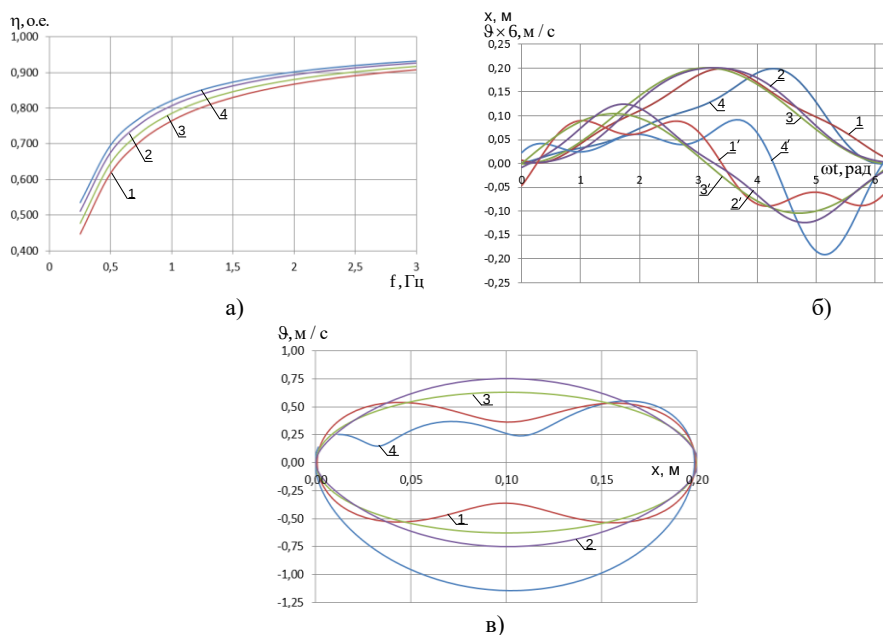


Рис.1. Энергетические характеристики и варианты закона движения индуктора

Fig.1. Energy characteristics and various motion laws of inductor

Удельное максимальное электромагнитное усилие СДПМ на штоке компрессора в длительном режиме будет

$$F_{эм.уд.мах} = \frac{J_D (1 - F_{\delta}^*)}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{max} k_s}{\gamma_m \gamma_{обм}}} \quad (17)$$

где F_{δ}^* – магнитное значение намагничивающей силы обмотки, приходящейся на одну пару полюсов, $(BH)_{\max} = \frac{B_r H_c}{4}$ – максимальная магнитная энергия ПМ.

Эксперимент

Экспериментальный макетный образец ЛМЭД для тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора представлен на рисунке 2. Исследование статических характеристик СДПМ позволяет сделать вывод о возможности его применения в составе линейного привода поршневого компрессора, рассчитанного на усилие 2000 Н [15]. В настоящее время вопросу управления СДПМ уделяется повышенное внимание [5, 16].



Рис. 2. Макетный образец тихоходного СДПМ для привода поршневого компрессора

Fig. 2. Mock-up model of PMSM for the piston compressor

На рисунке 3 представлены варианты функциональных схем системы управления СДПМ: а – от источника выпрямленного напряжения; б – от управляемого частотного преобразователя с применением широтно-импульсной модуляции. Цифрами обозначены: 1 – тихоходный СДПМ, 2 – компрессорная ступень, 3 – система управления, 4 – внешний магнитопровод, 5 – обмотка СДПМ, 6 – внутренний магнитопровод, 7 – постоянные магниты, 8 – датчик давления, 9 – датчик температуры, 10 – усилитель, 11 – цифровой осциллограф.

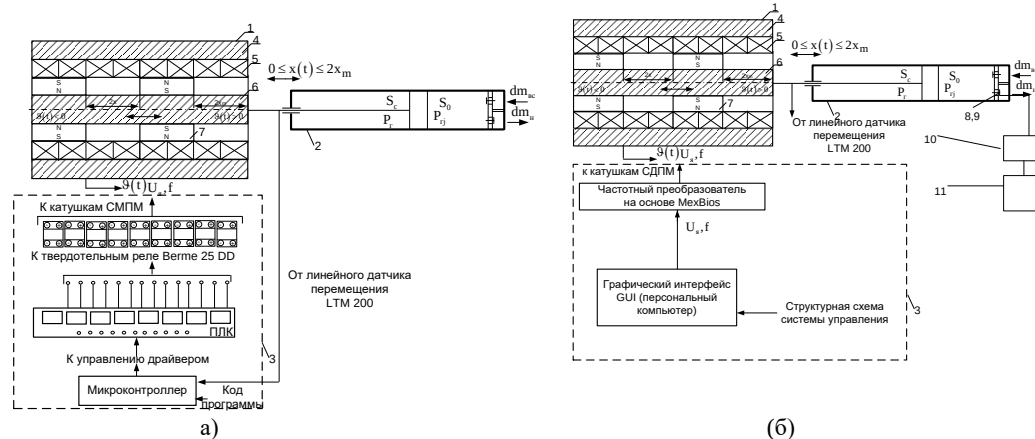


Рис. 3. Варианты функциональных схем управления СДПМ систем

Fig.3. Various functional diagrams of the PMSM control system

На рисунке 4 приведены результаты экспериментальных испытаний СДПМ в составе привода поршневого компрессора: а – осциллограмма рабочего процесса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора (максимальное давление 1.2 МПа, питание СДПМ осуществляется от источника выпрямленного напряжения) и б – осциллограмма, полученная при открытом выпускном клапане компрессора (питание СДПМ осуществляется от частотного преобразователя с открытым программным кодом под управлением программного обеспечения MexBios). На рисунке 4 цифрами обозначены: 1 – временная зависимость тока, 2 – закон движения хода индуктора, 3 – закон изменения скорости перемещения индуктора.

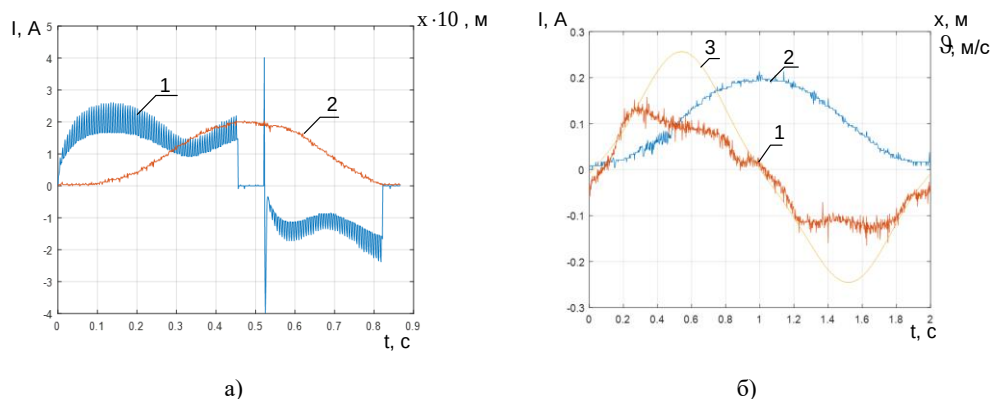


Рис. 4. Результаты испытаний ЛМЭП

Fig. 4. The linear driver test results

Установленная решением задачи оптимизация аналитическая взаимосвязь обобщенных параметров ЛМЭП обеспечивающая максимум КПД электромеханического преобразователя позволяет определить относительные потери в подсистемах ЛМЭП $P_{r\min}^* = 0,218$ о.е. и максимально возможный КПД для предложенной конструкции $\eta_{d,\max} = 0,821$ о.е. (при синусоидальном законе движения индуктора).

Выводы

1. На основе решения задачи оптимизации конструкции магнитной системы СДПМ установлена в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы привода, позволяющая получить максимальный КПД электромеханического преобразователя при заданном законе движения подвижной части.
2. Проведенные исследования разработанного макетного образца и системы управления на основе частотного преобразователя с открытым программным кодом позволяют учесть закон движения в теории проектирования СДПМ для линейного электропривода.
3. Исследовано влияние закона движения индуктора на максимум КПД СДПМ. Предложен оптимальный закон скорости движения индуктора во времени, учитывающий время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора.
4. Одним из подходов к заданию закона движения индуктора является применение частотного преобразователя с открытым программным кодом. Разработка настраиваемых моделей в среде *MexBios* позволяет реализовать алгоритмы пуска СДПМ, снижения пусковых токов, уменьшения времени выхода на установившийся режим.

Литература

1. Yusha VL, Busarov SS, Gromov AYU. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and petroleum engineering. 2017. Chemical and Petroleum Engineering, 53(7–8).
2. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Т.1. Теория и расчет. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2006. 456 с.
3. Huang Y. Hydraulic System Design of Hydraulic Actuators for Large Butterfly Valves // J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2014. V 7. pp. 150–155.
4. Петров Т.И., Сафин А.Р. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2 (50). С. 100-108.
5. Ang S., Rong-ming C., Hui-xing Z. Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011, pp. 1–4.
6. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 38-48.

7. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. И87 Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
8. Юша В.Л., Бусаров С.С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 80–89.
9. Бусаров С.С., Васильев В.К., Бусаров И.С., и др. Параметрический анализ рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчета // Омский научный вестник №4 (154). Омск, 2017 С.40-44.
10. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures // CES Trans. Electr. Mach. Syst. 2020. V. 4. №2. pp. 142–150, 2020.
11. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V., Tatevosyan A.A., Comparative Analysis of the Magnetolectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units AIP Conference Proceedings 2285, 030066-2020. p/030066-1-030066-8.: <https://doi.org/10.1063/5.0027290>.
12. Пахомин С.А., Пахомин Л.С. Оптимизационное проектирование вентильных машин с постоянными магнитами на пакета FEMM // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 6. С. 26-31.
13. Татевосян А.А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения // Омский научный вестник. 2019. №4 (166). С.48-51.
14. Ряшенцев, Н.П., Ковалев, Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 186 с.
15. Tatevosyan A.A., Polyakov, D.A., Kholmov, M.A. Characteristics research of a permanent magnet linear synchronous motor driving piston compressor // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021.
16. Poltschak F.A high efficient linear motor for compressor applications // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1356–1361.

Автор публикации

Татевосян Андрей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет.

References

1. Yusha VL, Busarov SS, Gromov AYU. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units. *Shemical and petroleum engineering*. 2017. Chemical and Petroleum Engineering, 53(7–8). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>.
2. Plastinin, P.I. *Porshnevyye kompressory*. Pt.1. Teoriya i raschet. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Kolos, 2006. 456 p.
3. Huang Y, Liu C, Bamed S. Hy draulic System Design of Hydraulic Actuators for Large Butterfly Valves. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 2014;7:150–155, Sep. 2014.
4. Petrov TI, Safin AR. Razrabotka i realizatsiya stenda dlya podtverzhdeniya effektivnosti topologicheskoi optimizatsii rotora sinkhronnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2021;13(2:(50):100-108.
5. Ang S, Rong-ming C, Hui-xing Z. *Research on the iterative learning control method for linear motor driven compressor*. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011. pp. 1–4.
6. Safin AR. Razrabotka matematicheskoi modeli avtonomnogo istochnika elektrosnabzheniya s svobodno-porshnevym dvigatelem na baze sinkhronnoi elektricheskoi mashiny vozvratno-postupatel'nogo deistviya s postoyannymi magnitami/ A.R. Safin, I.V. Ivshin, E.I. Gracheva, T.I. Petrov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(1):38-48.
7. Ismagilov FR, Gerasin AA, Khairullin IKh, et al. И87 Elektromekhanicheskie sistemy s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami. M.: Mashinostroenie, 2014. 267 p.

8. Yusha VL, Busarov SS. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupenei. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU*. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2018;24(4):80–89. doi: 10.18721/JEST.24408.

9. Busarov SS, Vasil'ev VK, Busarov IS, et al. Parametricheskii analiz rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupenei na baze verifitsirovannoi metodiki rascheta. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2017;4 (154):40-44.

10. Cui F, Sun Z, Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2020;4(2):142–150.

11. Yusha VL, Busarov SS, Nedovenchanyi AV, Tatevosyan AA. Comparative Analysis of the Magnetolectric Drive with Linear Drives of Low-Speed Single-Stage Piston Units. *AIP Conference Proceedings* 2285, 030066-2020-p/030066-1-030066-8. Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1063/5.0027290>.

12. Pakhomin SA. Optimizatsionnoe proektirovanie ventil'nykh mashin s postoyannymi magnitami na osnove paketa FEMM/S.A. Pakhomin, L.S. Pakhomin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2018;61(6):26-31.

13. Tatevosyan AA. Reshenie zadachi optimal'nogo upravleniya magnitoelektricheskogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2019;4 (166):48-51.

14. Ryashentsev NP, Kovalev YuZ. Dinamika elektromagnitnykh impul'snykh sistem. Novosibirsk: Nauka. 1974. 186 p.

15. Tatevosyan AA, Polyakov DA, Kholmov MA. Characteristics research of a permanent magnet linear synchronous motor driving piston compressor. *Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021*. doi 10.1109/REEPE51337.2021.9387980.

16. Poltschak F. A high efficient linear motor for compressor applications. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014, pp. 1356–1361.

Authors of the publication

Andrey A. Tatevosyan – Omsk State Technical University, Omsk, Russia.

Получено

13.12.2021 г.

Отредактировано

17.12.2021 г.

Принято

26.12.2021 г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 681.518

DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ С ТРАДИЦИОННОЙ ОБМОТКОЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБМОТКОЙ

Цветков А.Н., Доан Нгок Ши

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Современные требования к электроприводам предъявляют все более жесткие условия по энергоэффективности, габаритам и массе. Особенно ощутимы массо-габаритные параметры применительно к стремительно развивающемуся электротранспорту. Достигнутые технологические пределы практически не дают ощутимых результатов по улучшению характеристик известных конструкций, поэтому идет борьба за единицы процентов и доли процента в плане повышения эффективности оборудования. МАТЕРИАЛЫ. Отладка и доводка элементов электроприводов требует многочисленных испытаний на исследовательских стендах с применением измерительных каналов и аналогово-цифрового преобразования (АЦП), цифро-аналогового преобразования (ЦАП), цифро-цифрового преобразования (ЦЦП). РЕЗУЛЬТАТЫ. Создание исследовательских стендов подразумевает разработку аппаратно-программного комплекса (АПК) на основе быстродействующих вычислительных устройств. В состав АПК вошел разработанный преобразователь частоты с возможностью корректировки алгоритмов управления электродвигателем и математической модели самого электродвигателя. Объектом экспериментальных исследований являлись опытные образцы электроприводов на основе асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и комбинированной обмоткой статора. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье рассматриваются способы организации измерительных и управляющих каналов измерительно-информационной системы исследовательского стенда, позволяющего проводить исследования образцов асинхронных электродвигателей в режимах работы на холостом ходу и под нагрузкой.

Ключевые слова: электропривод; комбинированная обмотка; электродвигатель; аппаратно-программный комплекс; канал измерения; канал управления; датчик; стенд.

Для цитирования: Цветков А.Н., Доан Нгок Ши. Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования электроприводов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTRIC DRIVES OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR WITH TRADITIONAL WINDING AND MOTORS WITH COMBINED WINDING

AN. Tsvetkov, Doan Ngok Shi

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Modern requirements for electric drives impose increasingly stringent conditions for energy efficiency, dimensions and weight. The weight and size parameters are especially noticeable in relation to the rapidly developing electric transport. The achieved technological limits practically do not give tangible results in improving the characteristics of known structures, so there is a struggle for units of percent and fractions of a percent in terms of increasing the efficiency of equipment. *MATERIALS.* Debugging and fine-tuning of electric drive elements requires numerous tests on research benches using measuring channels and analog-to-digital conversion (ADC), digital-to-analog conversion (DAC), digital-to-digital conversion (DDC). *RESULTS.* The creation of research stands implies the development of a hardware-software complex (HSC) based on high-speed computing devices. The structure of the HSC included the developed frequency converter with the possibility of adjusting the algorithms for controlling the electric motor and the mathematical model of the electric motor itself. The object of experimental research was prototypes of electric drives based on asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor and a combined stator winding. *CONCLUSION.* The article discusses ways to organize the measuring and control channels of the measuring and information system of the research stand, which makes it possible to study samples of asynchronous electric motors in idling and under load modes.

Keywords: *electric drive; combined winding; electric motor; hardware and software complex; measurement channel; control channel; sensor, stand.*

For citation: Tsvetkov AN, Doan Ngok Shi. Hardware-software complex for experimental research of electric drives of asynchronous motors with squirrel-cage rotor with traditional winding and motors with combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6): 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-157-165.

Введение

Современное развитие техники ориентировано на повышение энергоэффективности электроприводов механизмов. В связи с этим проводятся исследования по нахождению путей повышения коэффициента полезного действия и коэффициентов мощности, как электродвигателей, так и преобразователей частоты и электроприводов в целом.

Одним из путей повышения энергоэффективности асинхронных электродвигателей, как наиболее распространенных в настоящее время, является применение комбинированных обмоток статора. Данные двигатели зарекомендовали себя с лучшей стороны в плане улучшения коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, уровня шума и вибраций.

Область применения электродвигателей с комбинированной обмоткой (ЭКО) очень широка: от различных производственных механизмов промышленности до приводов станков-качалок нефтедобывающей отрасли и в электротранспорте. При этом, в нефтедобыче существует проблема тяжелого пуска станка - качалки в холодное время после долгого простоя и образования эффекта запарафинивания напорной трубы скважины. Для решения данной проблемы чаще всего станки-качалки проектируются с электродвигателями завышенной мощности для создания достаточного пускового момента. Применение такого двигателя вызывает, в нормальном режиме работы станка-качалки, повышенный расход реактивной мощности и увеличение потерь активной, что ведет к снижению энергоэффективности.

Применение ЭКО, имеющих повышенный пусковой момент, позволяет снизить типоразмер и вывести его на работу в нормальном режиме с большей энергоэффективностью по сравнению с асинхронными двигателями с традиционной обмоткой статора.

Однако ЭКО имеет все преимущества по сравнению с традиционным асинхронным двигателем только при прямом пуске и работе от сети. При необходимости регулирования частоты вращения вала, разработчики электроприводов сталкиваются с рядом проблем. Вызваны данные проблемы тем, что обмотки смещены относительно друг друга на 30 градусов. Особенно сильные затруднения вызывает применение самого прогрессивного и эффективного принципа векторного управления.

Современный процесс нефтедобычи требует от электроприводов станков-качалок нефти регулирования скорости вращения и скорости качания в широком диапазоне частот,

эта необходимость наблюдается и в других отраслях, например в насосном оборудовании при регулировании производительности установки.

По сравнению с традиционными методами повышения энергоэффективности асинхронного привода новизна конструкции комбинированной обмотки заключается в изменении принципа конструирования обмоток двигателя, а именно: в совмещении двух схем подключения нагрузки к трехфазной цепи (звезда и треугольник) в одной обмотке, а также выборе оптимальных соотношений чисел пазов ротора и статора [1].

Электродвигатель с комбинированной обмоткой имеет лучшие показатели и энергетические характеристики, которые превышают показатели традиционного асинхронного электродвигателя на 3–5%. [2].

В результате многочисленных испытаний отремонтированных, с заменой обмотки статора на комбинированную, серийно выпускаемых асинхронных двигателей и последующей обработки полученных данных были сделаны выводы, что двигатели после ремонта имеют улучшенные по сравнению с паспортными параметрами:

- меньший потребляемый ток, 20-35% в зависимости от режима;
- более высокий пусковой момент - на 35%;
- меньшие пусковые токи - на 35%;
- больший минимальный пусковой момент - на 35%;
- больший максимальный пусковой момент - на 10%;
- имеют возможность эксплуатации как в режиме работы S1, так и в режиме работы S3;
- улучшены виброшумовые характеристики, в среднем уровень звука ниже на 5 дБ;
- КПД и $\cos\phi$, близкий к номинальному в диапазоне нагрузок от 30 до 140%;
- большая перегрузочная способность [3], [4].

Электродвигатели с комбинированной обмоткой пока не получили широкого распространения, хотя работы по их производству ведутся давно [5, 6]. В связи с незаинтересованностью производителей новых электродвигателей в изменении своих технологий, данная технология в основном применяется при ремонте двигателей в организациях, освоивших технологию изготовления комбинированной обмотки, предлагающих заказчику отремонтированные двигатели, у которых «сгорели» обмотки.

Частотнорегулируемый привод в сочетании с асинхронным ЭКО может быть выполнен с повышенной частотой питающего напряжения, что достигается за счёт меньших потерь в стали магнитопровода двигателя. Себестоимость такого привода получается существенно ниже, чем при использовании стандартных двигателей за счет уменьшения массо-габаритных показателей на 1...2 типоразмера, а также значительно снижаются уровень шума и вибраций за счет увеличения скорости вращения вала.

Поэтому возникает необходимость разработки алгоритмов управления частотными преобразователями для эффективного управления ЭКО особенно на низких скоростях. Одним из путей решения данной проблемы является раздельное управление каждым слоем обмотки, сдвинутым на 30 градусов, что ведет к существенному усложнению конструкции инвертора и его удорожанию, кроме этого исчезает возможность быстрой замены электродвигателя при выходе из строя.

В настоящее время ни один производитель преобразователей частоты не закладывает специальные алгоритмы для управления ЭКО. Но все большее распространение такого типа двигателей говорит о том, что в ближайшем будущем спрос на частотное регулирование энергоэффективных двигателей резко возрастет.

С целью выработки методов и подходов к управлению асинхронными ЭКО разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) для экспериментального исследования электроприводов на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой.

Состав аппаратно-программного комплекса

Функциональный состав аппаратно-программного комплекса показан на рисунке 1.

Изучение вопроса построения исследовательских стендов показал, что как правило, принято применять в качестве нагрузочного элемента электродвигатель постоянного тока с регулируемой системой питания обмотки возбуждения и якорной обмотки, построенной на изменении напряжения. Данный способ нагружения обладает рядом недостатков, основные из которых это отсутствие момента на валу двигателя при нулевых скоростях и сложность создания переменного момента при изменяющихся скоростях вращения [7, 8].

Система нагружения приводного электродвигателя, реализованная в описываемом АПК, учитывает опыт известных работ по исследованию динамических нагрузок в элементах механической и электрической частей различных механизмов, поэтому лишена

вышеуказанных недостатков и позволяет создавать тарированную величину как переменного, так и постоянного момента на любых скоростях вращения. Для этого в состав АПК введены преобразователь ПЧ-1 и асинхронный электродвигатель М1 (рис.1). ПЧ-1 реализован в виде промышленно выпускаемого преобразователя частоты *Altivar* с реализованным скалярным методом управления двигателем и регулированием по скорости вращения без обратной связи. В качестве нагрузочного режима работы выбран режим работы противовключением. При этом создаваемый нагрузочный момент направляется в сторону, противоположную направлению вращения исследуемого электродвигателя М2. Регулирование момента нагрузки осуществляется изменением заданной частоты вращения магнитного поля нагрузочного электродвигателя М1

Для привода исследуемого ЭКО применен разработанный преобразователь частоты ПЧ-2 (рис.1) с возможностью корректировки алгоритмов управления и математической модели управляемого двигателя [9]. Преобразователь частоты имеет в своем составе микропроцессорное устройство на базе микроконтроллера *ATmega2560*, измерительные устройства, силовые ключи с системой управления и блоки питания. Микроконтроллер имеет следующие характеристики: ядро 8-битный AVR, тактовая частота 16 МГц, объем *Flash*-памяти: 256 кБ, портов ввода-вывода всего 54, портов с АЦП 16, разрядность АЦП 10 бит, портов с ШИМ 15, разрядность ШИМ 8 бит, аппаратных интерфейсов SPI 1, аппаратных интерфейсов I²C / TWI 1, аппаратных интерфейсов *UART/Serial* 4.

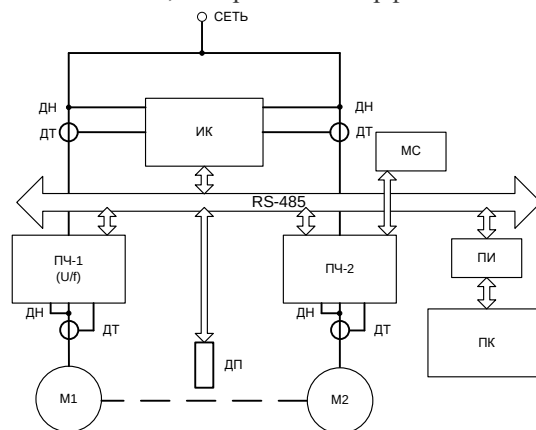


Рис. 1. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса. М1 – нагрузочный электродвигатель, М2 – исследуемый электродвигатель, ПЧ-1 – нагрузочный преобразователь частоты, ПЧ-2 – исследовательский преобразователь частоты, ИК – измерительный комплекс, ПК – персональный компьютер, ПИ – преобразователь интерфейсов, ДТ – датчики тока, ДН – датчики напряжения, ДП – датчик положения вала двигателя, RS-485 – цифровая шина передачи данных и удаленного управления АПК, МС – модуль удаленной связи

Fig.1. Functional diagram of the hardware-software complex. M1 – load electric motor, M2 – electric motor under investigation, FC-1 – load frequency converter, FC-2 – research frequency converter, IR – measuring complex, PC – personal computer, PI – interface converter, DT – current sensors, DN – voltage sensors, DP – motor shaft position sensor, RS-485 – digital bus for data transmission and remote control of APC, MS – remote communication module

Измерительный комплекс ИК применяется для определения энергетических характеристик электропривода ПЧ2-М2 в различных режимах работы и позволяет определить токи, напряжения, мощности, коэффициент мощности, гармонические составляющие и другие параметры. Реализован измерительный комплекс на основе анализатора качества электроэнергии *Fluke 43B* и цифрового осциллографа *ISD205B*. Осциллограф имеет следующие характеристики: частота дискретизации 20/48 Мвыб/сек, вертикальное разрешение 8-разрядное, диапазон усиления: От -6 до 6 В (зонд X1), от -60 до 60 В (зонд X10), вертикальная точность: $\pm 3\%$, диапазон времени: 1 нс - 20 с, сохранение данных в формате *Osc*, *Excel* и *Vmr*, спектральные анализаторы: пропускная способность: 20 МГц, алгоритм: БПФ, корреляция, точки БПФ: 8 - 1048576 / канал, измерение БПФ: гармонические (1-7), *SNR*, *SINAD*, *ENOB*, *THD*, *SFDR*, обработка фильтра: *FIR*-фильтр поддерживает произвольный диапазон частотной выборки и прямоугольник, треугольник, косинус, и другие. Результат измерения величин осциллографом показаны на рисунке 3 и 4.

Анализатор *Fluke* имеет следующие характеристики: диапазон напряжения 5...500 В с точностью измерения $\pm 1\%$, диапазон тока 50 А, 500 кА, 1250 кА с точностью измерения $\pm 1\%$, частотный диапазон 10 Гц ... 15 кГц с точностью измерения 0,5 %, диапазоны мощности Вт, ВА, ВАр 250 В, 250 МВт, 625 МВт, 1,56 ГВт с точностью измерения $\pm 2\%$, коэффициент мощности 0...1 с точностью измерения $\pm 0,04$, число измеряемых гармоник $DC..21, DC..33, DC..51$ с точностью 3 %, время регистрации измерений 4 мин...8 дней.

Персональный компьютер ПК (рис. 1) представляет собой систему управления и сбора информации с возможностью формирования управляющих воздействий на ПЧ-1, ПЧ-2 и ИК, а также получения от них измеренной и рассчитанной информации о энергетических характеристиках электродвигателей и электроприводов в целом. Для передачи данных в АПК реализована цифровая шина на основе интерфейса RS-485 с различными протоколами обмена информацией, например, промышленный *ModBusRTU*, протокол обмена *Fluke* и собственный протокол микропроцессора разработанного ПЧ-2. ПК подключен к цифровой шине через преобразователь интерфейсов ПИ, позволяющий согласовать интерфейсы RS-485 и USB. Модуль связи МС представлен устройством с преобразователем интерфейсов, осуществляющим преобразование сигналов, полученных по цифровой шине управления RS-485 в значения параметров внутреннего протокола для отправки их по каналам беспроводной связи.

В состав АПК вошли датчики тока ДТ, напряжения ДН и положения вала двигателя ДП. Датчики тока и напряжения, установленные после преобразователей частоты входят в их состав и используются в качестве измерительных органов с возможностью расчета параметров для нужд преобразователей частоты и дальнейшей передачи ее в ПК. Таким образом АПК использует в качестве датчиков элементы, встроенные в преобразователи частоты с уже реализованными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и аппаратом расчета действующих значений параметров [10].

В разработанном ПЧ-2 датчики напряжения и тока и соответствующие им АЦП работают в режиме измерения мгновенных значений. Данные измерения позволяют проводить оценку качества потребляемой электроэнергии и воздействие на сеть электропривода.

На практике, очень часто становится не возможным применение систем с высокой частотой дискретизации измерений для достижения достаточной точности полученных расчетных данных из-за ограниченных ресурсов микропроцессорных устройств. В таком случае становится достаточным проведение измерений с пониженной частотой дискретизации с целью экономии ресурсов вычислительной системы и снижения требований к аппаратной части систем управления. Для доказательства правильности работы системы с пониженной частотой дискретизации были построены математические модели напряжения синусоидальной формы и вычислены среднеквадратические значения для различного количества точек измерения. Результаты работы моделей показаны на рисунке 2.

При снижении частоты дискретизации напряжения до выборки каждые 1,5мс (см. рис.2), в среднем на период напряжения приходится 14 значений напряжения, но стабильная величина среднеквадратического значения напряжения получается лишь при обработке 32 значений, т.е. каждые 48мс или 20 значений в секунду. Данные выводы сделаны на основе реализации и опробования математических моделей, работающих на различной частоте дискретизации. Снижение частоты дискретизации может потребоваться при необходимости ввода в программу расчетов дополнительных величин, таких как частота сети, коэффициент мощности и других.

Измерительные каналы АПК построены на основе датчиков тока и напряжения с преобразованием измеренных мгновенных величин в АЦП. Применение 12-ти разрядных АЦП по каждому каналу в составе разработанного ПЧ-2 является достаточным для обеспечения точности вычислений с погрешностью 0,5 % и частотой дискретизации 600 Гц.

Измерение тока осуществляется с применением датчиков тока ЗМСТ103С с номинальным током до 5А и коэффициентом трансформации 1000/1. Датчики имеют следующие характеристики: номинальный входной ток 5 А, номинальный выходной ток 5мА, преобразование измеряемой величины 1000:1, ограничение по входному току не более 20 А, линейный диапазон 0...10 А, линейность 0,2 %, класс точности 0,2, напряжение изоляции не более 3000 В. Данные датчики позволяют осуществлять измерения на нагрузке мощностью до 3 кВт с достаточно высокой точностью.

Измерение напряжения осуществляется с применением модулей на базе маломощного трансформатора ЗМРТ101В с номинальным напряжением 250 В. Датчики напряжения имеют следующие характеристики: входное напряжение переменное до 250 В, выходной сигнал: аналоговый 0...5 В, ток обмоток 2 мА, напряжение питания: 4...12В, рабочая температура: -40...+70С°. Применение датчиков напряжения с схемой соединения в

звезду и организацией «плавающей» нулевой точки позволяет выполнять измерения в сети питания нагрузки до 400 В трехфазного напряжения.

Измерение положения вала исследуемого электродвигателя осуществляется с применением цифрового тахометра *RPM Speed Meter*. В состав тахометра входят бесконтактный датчик и модуль преобразования импульсов в частоту вращения вала. Бесконтактный датчик имеет следующие характеристики: номинальное расстояние срабатывания 4 мм, максимальная частота срабатывания 1 кГц, гистерезис переключения не более 15 % Sr, точность повторения не более 1 % Sr, температурная погрешность не более 10 % Sr. Модуль преобразования импульсов имеет диапазон измерения: 5...9999 об/мин, скорость обновления дисплея 3 раза в секунду, точность измерения ± 2 об/мин, частота обновления измерений 100 Гц, частота входного сигнала 2,5...2500 Гц, приведенная погрешность измерения 0,5 %.

При отсутствии датчика момента, развиваемого на валу исследуемого электродвигателя, в составе АПК, проблема получения данного немаловажного параметра была решена вычислением косвенно по известным данным. При этом в задачи, решаемые АПК не входит определение точного значения крутящего момента, основной задачей является подбор алгоритмов управления и коэффициентов, корректирующих математическую модель электродвигателя с целью получения наилучших характеристик, поэтому момент может быть рассчитан в относительных единицах. Для этого необходимо иметь данные о потребляемой двигателем мощности, его коэффициент полезного действия и скорость вращения вала.

Полученные от датчиков напряжения и ток дают возможность определения мощности, на основе которой можно вычислить мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (1)$$

Здесь P_1 – мощность, потребляемая электродвигателем, P_2 – мощность на валу электродвигателя, η – КПД электродвигателя. Момент на валу электродвигателя вычисляется по формуле:

$$M = \frac{60}{2\pi \cdot 9.81} \cdot \frac{P_2}{n} = \frac{1}{1,028} \cdot \frac{P_2}{n} = 0,975 \cdot \frac{P_2}{n} \quad (2)$$

Здесь M – крутящий момент на валу двигателя, n – частота вращения вала двигателя. Таким образом в составе АПК была решена проблема определения крутящего момента косвенным путем без применения дорогостоящих и сложных по конструкции датчиков момента. Экспериментальные исследования показали точность рассмотренного метода определения момента в пределах 1 %.

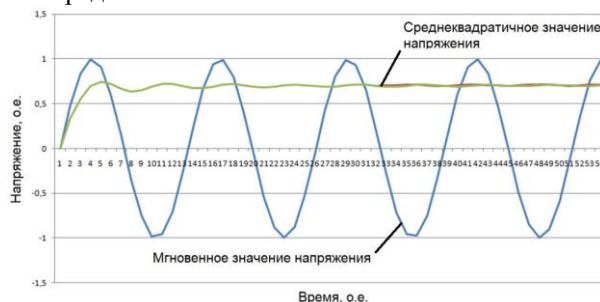


Рис. 2. Расчет среднеквадратичного значения величины напряжения при частоте дискретизации каждые 1,5мс

Fig. 2. Calculation of the RMS value of the voltage value at a sampling rate of every 1.5ms

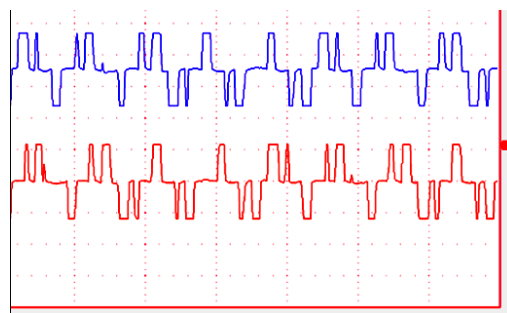


Рис. 3. Измерение осциллографом формы питающего напряжения преобразователя частоты

Fig. 3. Oscilloscope measurement of the power supply voltage waveform of the frequency converter

Основные результаты

Исследования, проведенные на представленном АПК позволили выявить тенденцию совместной работы преобразователя частоты с векторным управлением и асинхронного ЭКО, которая показывает плохую их совместимость из-за изменения магнитной системы двигателя (рис.5). Проведенные работы по корректировке математической модели управления на первом этапе исследования позволили увеличить крутящий момент двигателя и приблизить его к традиционному асинхронному электродвигателю. На втором этапе исследования была осуществлена попытка увеличения крутящего момента и приблизить его к моменту, развиваемому ЭКО при прямом включении в сеть. Опытным путем удалось достичь увеличения крутящего момента приблизительно на 1 % подбором коэффициентов, заложенных в модель управления. При этом были выявлены пути дальнейшего совершенствования алгоритмов управления для достижения максимальной энергоэффективности ЭКО при работе в составе электроприводов с векторным управлением.

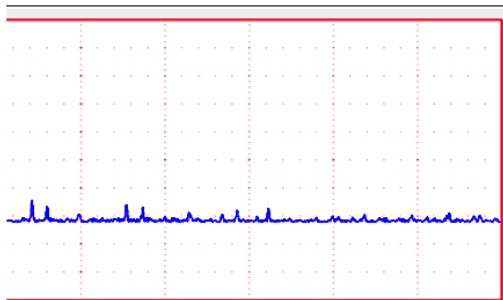


Рис. 4. Измерение осциллографом спектрального состава питающего напряжения преобразователя частоты

Fig. 4. Oscilloscope measurement of the spectral composition of the supply voltage of the frequency converter



Рис.5. Внешний вид аппаратно-программного комплекса для исследования электродвигателей с комбинированной обмоткой

Fig. 5. Appearance of the hardware-software complex for the study of electric motors with a combined winding

В состав аппаратно-программного комплекса вошла система удаленной беспроводной связи в виде модуля связи МС (рис. 1) [11]. Применение системы позволило отладить основные методики управления, передачи данных и архивирования накопленных данных. Основной целью применения модуля связи стала возможность интеграции АПК в систему управления и мониторинга промышленных предприятий с реализацией дополнительного канала передачи данных. Данная функция становится особенно актуальной при проведении длительных исследований на действующих электроустановках предприятий с целью проведения сравнительных испытаний алгоритмов управления электродвигателями в составе электроприводов. Данный канал связи позволяет осуществлять мониторинг электропривода, накопление и хранение измеренных данных, управлять электроприводом при необходимости изменения режима работы.

Выводы

В разработанном АПК реализованы аналоговые и цифровые каналы контроля и управления, вычислительные алгоритмы определения параметров, системы визуализации и архивирования. Технические решения, заложенные в конструкцию АПК, а также гибкость алгоритмов работы системы управления позволяют проводить широкий спектр исследований с применением разнообразных объектов испытания. Применение канала связи позволяет повысить мобильность и универсальность комплекса, а также позволяет отказаться от применения мощной вычислительной техники и перейти на работу с регистраторами данных с последующей их обработкой.

В состав системы управления АПК включены программные решения, на которые возложено несколько задач: в процессе проведения испытаний участвуют в обработке

данных, полученных от датчиков, имеют возможность управления преобразователем частоты и позволяют проверить правильность функционирования заложенных алгоритмов управления.

В результате применения разработанного АПК появилась возможность отработки и отладки алгоритмов управления асинхронными электродвигателями с комбинированной обмоткой за счет изменения параметров математической модели, на основе которой формируются управляющие сигналы на инвертор в зависимости от скорости вращения вала и нагрузки на нем. Сложности управления такими электродвигателями вызваны конструктивными особенностями, при которых две обмотки смещены друг относительно друга на 30 градусов и при этом преобразователи частоты с реализованным прогрессивным векторным управлением не способны сформировать правильное положение магнитного поля статора, так как в них заложена математическая модель классического асинхронного электродвигателя.

Литература

1. Змиева К.А., Яковлев А.П. Оптимизация линейки энергосберегающих асинхронных двигателей с габаритами от 100 до 132 с совмещенными обмотками // Электротехника. 2014. № 7. С. 32-35.
2. Мощинский Ю.А., Соколова Е.М. Преимущества и недостатки совмещенной обмотки «славянка» // Электричество. 2018. № 11, с. 23–31.
3. Дейнего В.С., Дуюнов Д.А., Иванов В.А. Изменение конструкции обмоток асинхронных электродвигателей потенциал обеспечения надёжности электросетей // Сети России. №2 (29), март–апрель. 2015. с. 42-49
4. Мухаметшин А.И., Корнилов В.Ю. Модернизация электроприводов штанговых насосных установок на основе энергоэффективных асинхронных электродвигателей к комбинированной двухслойной обмоткой. // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы 6 Национальной научно-практической конференции, в 2 т. Казань, 2020. С. 75-78.
5. Афлетонов Р.А., Гордеев В.Ю., Усманов И.К., и др. Обмотка энергоэффективного асинхронного двигателя. Патент на полезную модель RU 176753 U1, 29.01.2018. Заявка № 2017109563 от 21.03.2017.
6. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Автоматизированный стенд для исследования и испытания электроприводов. Патент РФ № 121664, МПК H02H, Оpubл. 27.10.12, Бюл. №30.
7. Андреева Н.В., Ахунов Д.Д., Корнилов В.Ю. Установка для оценки эффективности функционирования асинхронного электропривода. Патент РФ № 129260, МПК G01R31/00, Оpubл. 20.06.2013, Бюл. №6.
8. Doan N.S., Tsvetkov A.N. and Nguyen T.H. Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an Arduino. E3S Web of Conferences 288, 01059 (2021).
9. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Кувшинов Н.Е., Петров Т.И., Гибадуллин Р.Р. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. Т. 23. № 4. С. 364-375.
10. Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Цветков А.Н., Усманов И.К., Гибадуллин Р.Р. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 58-66.
11. Chomat M., Schreier L. and Bendl J. Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration. Proc. 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. IECM 2018, pp. 2478–2482, 2018.
12. Duyunov D.A., Duyunov E.D., Teplova Y.O., et al. Induction Motors Redesign Using the Combined Windings Principle Based on Computer Models Study As a Means of Improving the Energy-Efficiency and Performance Characteristics of Electric Drives, Modern High Technol. 2018. no. №5. pp. 56–61, 2018.
13. Raziee S.M., Misir O. and Ponick B. Combined Star-Delta Winding Analysis. IEEE Trans. Energy Convers. 2018. V. 3, no. 1. pp. 384–394.
14. Chomat J.B. M. and Schreier L. Analysis of magnetic field distribution in induction machine with combined star-delta stator winding. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). The Journal of Engineering. 2019. pp. 4369–4374.
15. Ludek M.C. and Bendl J. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding. 2017. V. 2017. no. 1. pp. 147–153.

Авторы публикации

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Доан Нгок Ши – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Zmиеva KA, Yakovlev AP. Optimization of the line of energy-saving asynchronous motors with dimensions from 100 to 132 with combined windings. *Electrical engineering*. 2014;7;32-35.
2. Moshchinsky YuA, Sokolova EM. Advantages and Drawbacks of the SlavyankaType Combined Winding. *Elektrichestvo*. 2018;11:23–31
3. Deinego VS, Duyunov DA, Ivanov VA. Changing the design of the windings of asynchronous electric motors has the potential to ensure the reliability of electrical networks. *Russian networks*. 2015;2(29):42-49
4. Mukhametshin AI, Kornilov VYu. Modernization of electric drives of sucker-rod pumping units based on energy-efficient asynchronous electric motors to a combined two-layer winding. *Proceedings of the VI National Scientific and Practical Conference, in 2 volumes. Kazan*. 2020;75-78.
5. Afletonov RA., Gordeev VYu., Usmanov IK, et.al. *Winding of an energy-efficient asynchronous motor*. Utility model patent RU 176753 U1, 01/29/2018. Application No. 2017109563 dated 03/21/2017.
6. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. *Automated stand for research and testing of electric drives*. Patent of the Russian Federation No. 121664, IPC H02H, Publ. 27.10.12, Bull. No. 30.
7. Andreeva NV, Akhunov DD, Kornilov VYu. *Installation for evaluating the effectiveness of the functioning of an asynchronous electric drive*. Patent of the Russian Federation No. 129260, IPC G01R31 / 00, Publ. 06/20/2013, Bull. No. 6.
8. Doan NS, Tsvetkov AN, Nguyen TH. *Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an Arduino*. E3S Web of Conferences 288. 01059 (2021).
9. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et.al. Development of a stand for the study of electric drives of pumping units. *Bulletin of MSTU*. 2020;23:4: 364-375.
10. Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF, et.al. Stand for post-repair testing of asynchronous motors. *Izvestiya VUZov. Energy issues*. 2019;21:3-4:58-66.
11. Chomat M, Schreier L, Bendl J. *Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration*. *Proc. 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018*;2478–2482.
12. Duyunov DA, Duyunov ED, Teplova YO, et.al. Induction Motors Redesign Using the Combined Windings Principle Based on Computer Models Study As a Means of Improving the Energy-Efficiency and Performance Characteristics of Electric Drives. *Modern High Technol*. 2018;5:56-61.
13. Raziee SM, Misir O, Ponick B. Combined Star-Delta Winding Analysis. *IEEE Trans. Energy Convers*. 2018;33:384-394.
14. Chomat JBM, Schreier L. Analysis of magnetic field distribution in induction machine with combined star-delta stator winding. *The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). The Journal of Engineering*. 2019; 4369–4374.
15. Ludek MC, Bendl J. Analysis of properties of induction machine with combined parallel star-delta stator winding. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* 2017;1:147–153.

Authors of the publication

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Doan Ngok Shi – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

26.11.2021 г.

Отредактировано

14.12.2021 г.

Принято

28.12.2021 г.