

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

*Научно-технический
и производственный журнал*

(23) 3 / 2021

POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY

Scientific & Technical Journal

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	PIETRO ZUNINO
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Научный редактор тематического выпуска	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА: ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ИПК "Бриг", г. Казань,
Адрес типографии:	420097, г. Казань, ул. Академическая, д. 2, ОФИС 009

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2021
Т.23, № 3
Май- Июнь

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

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Министерство образования и науки РФ
Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АРАКЕЛЯН Э.К.
БУХМИРОВ В.В.
ГУМЕРОВ Ф.Х.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ИВШИН И.В.
ЛАПТЕВ А.Г.
ТЮТИКОВ В.В.
ЧИЧИРОВА Н.Д.
МИНУЛЛИН Р.Г.
ЯКИМОВ Н.Д.
ФРОЛОВ В.Я.
РАССЫЛКИН А.С.

КОРОВКИН Н.В.
ВИНОГРАДОВ А.В.
ДОВГУН В.П.
СИНЮКОВА Т.В.
ЩИННИКОВ П.А.
DESHPANDE PRAVIN
MICHAIL KOLCUN
НИКОЛАЕВА Л.А.
САДЫКОВ М.Ф.

Свидетельство о регистрации СМИ:

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

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2021
Vol. 23, № 3
May-June
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

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

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

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

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

Sections:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND
SYSTEMS

Editorial board:

EDIK K. ARAKELYAN
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
FARID M. GUMEROV
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
ANATOLY G. LAPTEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
NATALIYA D. CHICHIROVA
RENAT G. MINULLIN
NIKOLAY D. YAKIMOV
VLADIMIR YA. FROLOV
ANTON RASSÖLKIN

NIKOLAY V. KOROVKIN
ALEXANDR V. VINOGRADOV
VALERY P. DOVGUN
TATYANA V. SINYUKOVA
PAVEL A. SHCHINNIKOV
DESHPANDE PRAVIN
MICHAIL KOLCUN
LARISA A. NIKOLAEVA
MARAT F. SADYKOV

Address

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

Tel./fax:

+7 (843) 527-92-76

Email:

problems_ener@mail.ru

Site:

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА. Е.И., ГОРЛОВ. А.Н., ШАКУРОВА. З.М., ЛОГАЧЕВА А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях.	3
САФИН А.Р., RANJAN KUMAR ВЕНЕРА. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин.	14
ВИНОГРАДОВ А.В., ВИНОГРАДОВА А.В., СЕЙФУЛЛИН А.Ю., БУКРЕЕВ А.В., БОЛЬШЕВ В.Е. Принципы управления конфигурацией электрической сети и задачи их реализации.	34
СОЛЮЯНОВ Ю.И., АХМЕТШИН А.Р., СОЛЮЯНОВ В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания.	47
ВОЛОТКОВСКАЯ Н.С., СЕМЁНОВ А.С., БЕБИХОВ Ю.В., ШЕВЧУК В.А., ФЕДОРОВ О.В. перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России. .	58
ПЕТРОВ Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей.	70
РОМАНОВА В.В., ХРОМОВ С.В., СУСЛОВ К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей.	80
КАПАНСКИЙ А.А. Повышение энергетической эффективности водозаборов за счёт повторного использования промывной воды и сокращения времени фильтроцикла.	90
БЕЛОГЛАЗОВ А.В., РУСИНА А.Г., ФОМЕНКО О.В., ПЕХОТА Д.А., ФЁДОРОВА В.А. Применение ABC и HML-методик для определения и оптимизации запаса комплектующих электротехнического оборудования.	103
МЕЩЕРЯКОВ В.Н., СИБИРЦЕВ. Д.С., ВАЛТЧЕВ. С., ГРАЧЕВА Е.И. Система правления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом.	116
МАНАХОВ В.А., ЦВЕТКОВ А.Н. Определение состояния и функционирования оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации по параметрам ваттметрограммы.	127
БАСЕНКО В.Р., ВЛАДИМИРОВ О.В., ИВШИН И.В., НИЗАМИЕВ М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.	140
БОРОДИН М.В., ЗАХАРОВ С.Ю., БЕЛИКОВ Р.П., БОБРОВСКИЙ В.И. Усовершенствование технологии монтажа «подушки» под фундамент КТП 10/0,4 кВ киоскового типа.	154
ЕРАШОВА Ю.Н., ИВШИН И.В., ИВШИН И.И., ТЮРИН А.Н. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание.	168
ГАЛЕЕВА Р.У., КУКСОВ С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.	181
ПАЛКИН Г.А., ГАЙСИН А.Ф. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур.	194
РАХИМОВ О.С., МИРЗОЕВ Д.Н., ГРАЧЕВА Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях.	209

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

ABDULLAZYANOV EYU, GRACHEVA EI, GORLOV AN, SHAKUROVA ZM, LOGACHEVA AG. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks.	3
SAFIN AR, RANJAN KUMAR BEHERA. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines.	14
VINOGRADOV AV, VINOGRADOVA AV, SEYFULLIN AY, BUKREEV AV, BOLSHEV VE. Principles of electrical grid configuration management and tasks of their implementation.	34
SOLUYANOV YUI, AKHMETSHIN AR, SOLUYANOV VI. Update of specific electric loads public premises, built in residential buildings.	47
VOLOTKOVSKAYA NS, SEMENOV AS, BEBIKHOV YV, SHEVCHUK VA, FEDOROV OV. Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia.	58
PETROV TI. Modification genetic algorithm for topological optimization the rotor of synchronous motors.	70
ROMANOVA VV, KHROMOV SV, SUSLOV KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors.	80
KAPANSKY AA. Increasing the energy efficiency of water inlets by re-using washed water and reducing filter cycle time.	90
BELOGLAZOV AV, RUSINA AG, FOMENKO OV, PEKHOTA DA, FYODOROVA VA. ABC and HML-methods application for determination and optimization of stock for electrical equipment accessory parts.	103
MESHCHERYAKOV VN, SIBIRTSEV DS, VALTCHEV S, GRACHEVA EI. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive.	116
MANAKHOV VA, TSVETKOV AN. Determination of the state and functioning of the equipment of rod well pumping units in the operation process by the parameters of the watmetrogram.	127
BASENKO VR, VLADIMIROV OV, IVSHIN IV, NIZAMIEV MF. Contactless laser control and measuring complex for determining the level of winding pressure and magnetic conductor of power transformer.	140
BORODIN MV, ZAKHAROV SYU, BELIKOV RP, BOBROVSKY VI. Improvement of the technology of installation of «pillows» under the foundation of CTS 10 / 0.4 kV kiosk type.	154
ERASHOVA YUN, IVSHIN IV, IVSHIN II, TYURIN AN. Device for testing ARC breakdown and spark gap protection devices.	168
GALEEVA RU, KUKSOV SV. Algorithm for simulating the self-starting of a group of asynchronous electric motors with a short-circulated rotor.	181
PALKIN GA, GAYSIN AF. Research of the optimal method of control of the first rise pumps electric drives operated in conditions of negative temperatures.	194
RAKHIMOV OS, MIRZOEV DN., GRACHIEVA E.I. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks.	209



ВЛИЯНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Э.Ю. Абдуллазянов¹, Е.И. Грачева¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹,
А.Г. Логачева¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск, Россия
epp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать алгоритм оценки потерь электроэнергии с учетом влияющих факторов в магистральных схемах цехового электроснабжения. Провести исследование влияния основных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление распределительного шинпровода. *МЕТОДЫ.* Используются поэлементные методы расчета потерь активной мощности с помощью эквивалентного сопротивления на примере участка магистральной схемы цеховой сети. Исследовать такие факторы, влияющие на эквивалентное сопротивление шинпровода, как среднеквадратичный коэффициент загрузки, коэффициент формы графика нагрузки, сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов и температура окружающей среды. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Вычислены значения сопротивлений линий ответвлений от шинпровода с учетом нагревания проводников и сопротивлений автоматических выключателей и магнитных пускателей, установленных на линии при поэлементном расчете. Выявлены соотношения в величине эквивалентного сопротивления шинпровода значения сопротивлений контактных соединений низковольтных электрических аппаратов, установленных на линиях ответвлений от шинпровода, значения сопротивлений линий ответвлений с учетом нагревания, значение сопротивления шинпровода и значения сопротивления, обусловленного нагревом шинпровода. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определена доля каждого из исследуемых параметров в величине эквивалентного сопротивления шинпровода. Вычислено значение относительной погрешности определения эквивалентного сопротивления шинпровода в зависимости от числа присоединенных электроприемников и при учете исследуемых параметров. Проведена оценка величины потерь ЭЭ участка магистральной схемы цеховой сети в соответствии с суточным графиком нагрузки потребителей.

Ключевые слова: *потери электроэнергии; эквивалентное сопротивление сети; электрическая сеть 0,4 кВ; сопротивление контактных соединений низковольтных аппаратов; среднеквадратичный коэффициент загрузки; коэффициент формы графика нагрузки; температура окружающей среды.*

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., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13.

INFLUENCE OF LOW-VOLTAGE ELECTRICAL SWITCHING AND PROTECTING DEVICES AND PARAMETERS OF ELECTRICAL EQUIPMENT ON ELECTRICITY LOSSES IN WORKSHOP POWER SUPPLY NETWORKS

EYu. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹, AG. Logacheva¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop an algorithm for estimating electricity losses, taking into account the influencing factors in the main circuits of shop power supply. To study the influence of the main parameters of electrical equipment on the equivalent resistance of the distribution busbar. *METHODS.* We use element-by-element methods for calculating active power losses using equivalent resistance on the example of a section of the main circuit of the shop network. Factors affecting the equivalent busbar resistance, such as the root-mean-square load factor, the load graph shape factor, the resistance of the contact connections of switching devices, and the ambient temperature, are investigated. *RESULTS.* The values of the resistances of the branch lines from the busbar are calculated taking into account the heating of the conductors and the resistances of the circuit breakers and magnetic starters installed on the line during the element-by-element calculation. The relations in the value of the equivalent resistance of the busbar to the values of the resistances of the contact connections of low-voltage electrical devices installed on the branch lines from the busbar, the values of the resistances of the branch lines taking into account heating, the value of the resistance of the busbar and the values of the resistance due to the heating of the busbar are revealed. *CONCLUSIONS.* The share of each of the studied parameters in the value of the equivalent resistance of the busbar is determined. The value of the relative error in determining the equivalent resistance of the busbar depending on the number of connected electric receivers and taking into account the studied parameters is calculated. The estimation of the value of the electricity losses of the section of the main scheme of the shop network was carried out in accordance with the daily schedule of the load of consumers.

Keywords: power losses; equivalent network resistance; 0.4 kV electrical network; resistance of contact connections of low-voltage devices; RMS load factor; load graph shape coefficient; ambient temperature.

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: EYu. Abdullazyanov, EI. Gracheva, AN. Gorlov, ZM. Shakurova, AG. Logacheva. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13.

Введение

В промышленных и электротехнических комплексах значительную долю составляют системы внутрицехового электроснабжения напряжением до 1 кВ. Для топологии таких систем характерным является значительная протяженность и разветвленность низковольтных сетей и существенная величина потерь электроэнергии (ЭЭ) в них [1-5]. С другой стороны, в настоящее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения стоимости расходуемой ЭЭ, поэтому возникает необходимость в разработке методик достоверной оценки величины потерь ЭЭ в системах внутрицехового электроснабжения [6-10].

Решение проблемы увеличения точности учета расхода ЭЭ, повышения энергоэффективности электрооборудования промышленных комплексов требует применения современных компьютерных технологий и мониторинга потерь [11-16].

Материалы и методы

Величина потерь ЭЭ в кабеле (проводе) определяется по выражению [3; 17-18]:

$$\Delta W = 3R_{\Sigma} \sum_0^T I^2(t) dt \quad (1)$$

где $I(t)$ – величина тока в кабеле (проводе) в момент времени t ; R_{Σ} – величина эквивалентного сопротивления кабеля (провода).

Проанализируем и оценим влияние факторных характеристик схемы и режимов на точность расчета потерь ЭЭ для электрооборудования магистральных схем (рис. 1). В таблице 1 представлены характеристики электрооборудования.

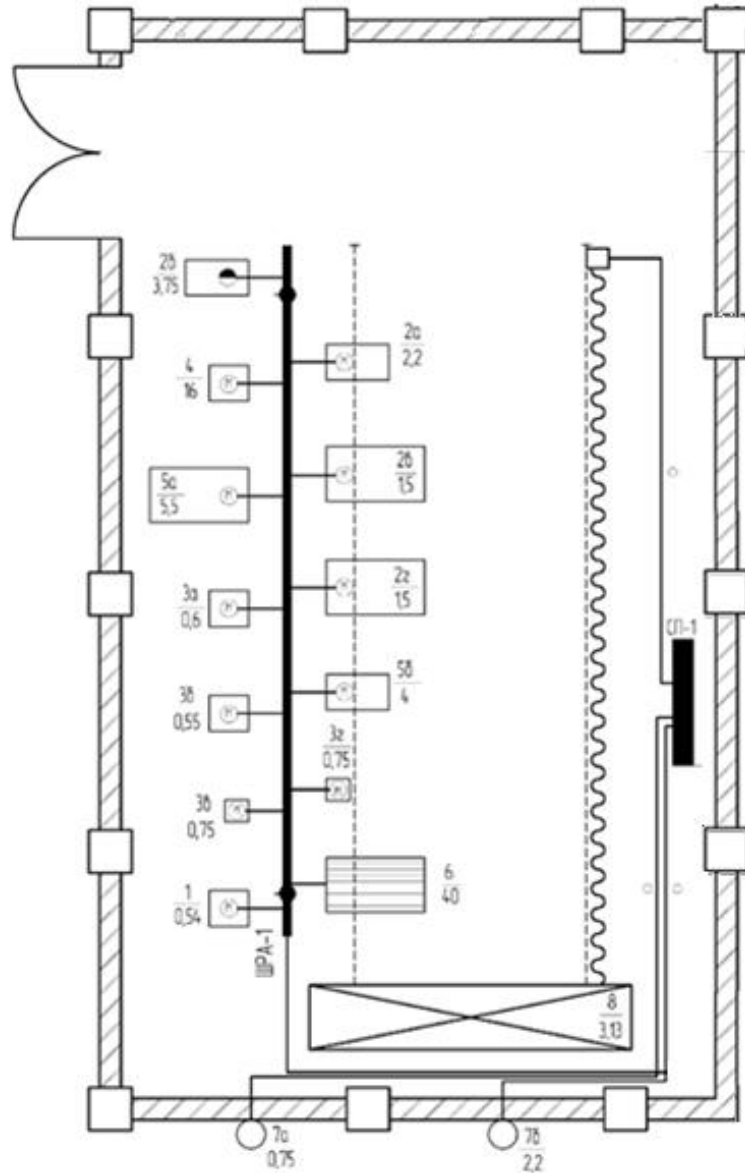


Рис.1. Участок магистральной схемы внутрицеховой сети

Fig. 1. Section of the main circuit of the intra-shop network

$$R_{\text{эквив}} = \left[r_{0, \text{ш}20} l_{\text{ш}} \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot \left[1 + \alpha_{\text{ш}} (\Theta_{\text{ш}} - 20^0) \right] + \frac{r_{20} \cdot l_{\text{отв}}}{n} \left[1 + \alpha_{\text{отв}} (\Theta_{\text{пр}} - 20^0) \right] + \frac{\sum_{i=1}^{\kappa} r_{i, \text{ан}}}{n} \quad (2)$$

где, $r_{0, \text{ш}20}$ – значение сопротивления одного метра шинпровода при 20^0 С., $l_{\text{ш}}$ – длина шинпровода, м;

n – число присоединенных к шинпроводу потребителей;

r_{20} - значение удельного сопротивления одного метра ответвительного кабеля при 20С, мОм/м

$\theta_{ш}$ - температура шинопровода, °С,

$l_{отв}$ - длина кабеля ответвления от шинопровода, м;

$\alpha_{отв}$ - значение температурного коэффициента роста сопротивления материала проводника линии, для меди равно 0,00428 1/°С;

$\alpha_{ш}$ - значение температурного коэффициента роста сопротивления материала проводника линии, для алюминия равно 0,0038 1/°С;

$\theta_{пр}$ - значение температуры жилы проводника, зависящее от токовой нагрузки линии и от температуры окружающей среды, °С;

$\sum_{i=1}^k r_{i,an}$ - общая сумма сопротивлений контактов и контактных соединений

низковольтных электрических аппаратов, установленных на линии, мОм.

Величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения приведены в таблице 2 [3].

Питание электроприемников, подключенных к шинопроводу производится по кабелям марки ВВГнг-Is. В таблице 3 даны параметры линий участка схемы внутрицеховой сети.

Таблица 1

Характеристика электрооборудования

Наименование электроприемников	№ линии	Номинальная мощность P_n , кВт	Длина линии, м	Расчетный ток в линии I_p , А	Допустимый длительный ток $I_{доп}$, А	Сечение провода, мм ²	Удельное сопротивление кабеля r_0 , мОм/м	Количество автоматов и контактов	Количество магнитных пускателей	Коэффициент загрузки линии k_z
1. Настольный сверлильный станок <i>Aiztronic 9</i>	Л11	0,54	2,7	2,9	19	1,5	12,3	1	1	0,15
2в. Универсально-фрезерный станок <i>MF4 Vario DPA</i>	Л12	3,75	2,7	13,4	19	1,5	12,3	1	1	0,71
2г. Универсально-фрезерный станок <i>Proma FHV-50P</i>	Л11	1,5	2,7	6,0	19	1,5	12,3	1	1	0,32
3а. Токарный станок <i>Opti D 180x300 Vario</i>	Л4	0,6	2,7	2,6	19	1,5	12,3	1	1	0,14
3б. Токарный станок <i>BD-920W Jet</i>	Л3	0,55	2,7	2,3	19	1,5	12,3	1	1	0,12
3в. Токарный станок <i>Quantum D210x400</i>	Л2	0,75	2,7	3,2	19	1,5	12,3	1	1	0,17
3г. Токарный станок <i>Quantum D210x400</i>	Л9	0,75	2,7	3,2	19	1,5	12,3	1	1	0,17
5а. Универсально-фрезерный станок <i>MF2 Vario DPA</i>	Л5	4	2,7	8,2	19	1,5	12,3	1	1	0,43
5б. Универсально-фрезерный станок <i>MF4 Vario DPA</i>	Л10	5,5	2,7	11,2	19	1,5	12,3	1	1	0,59
6. Токарный станок <i>BD-920W Jet</i>	Л8	0,55	2,7	2,4	19	1,5	12,3	1	1	0,12
2а. Универсально-фрезерный станок <i>MF1 Vario</i>	Л13	6,5	2,7	19,8	26	2,5	7,4	1	1	0,76
2б. Универсально-фрезерный станок <i>MF2 Vario DPA</i>	Л7	4	2,7	8,7	19	1,5	12,3	1	1	0,46
4. Универсально-фрезерный <i>MF1 Vario</i>	Л6	5	2,7	26,8	34	4	4,63	1	1	0,79
<i>Canalis KNA-04 63 A</i>	ШР	27,64	15	42	63	-	1,9	-	-	0,67

Для магистральных схем, представленных распределительными шинопроводами, величина эквивалентного сопротивления шинопровода вычисляется [3]:

Таблица 2

Эмпирические зависимости величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения в функции номинальных токов

Тип электрического аппарата низкого напряжения	Значение номинального тока, I_n , А	Эмпирическая зависимость сопротивления контактов аппарата в функции значения номинального тока
Магнитные пускатели	<75	$R=830/I_n$
	≥ 75	$R=760/I_n$
Автоматы и контакторы	<65	$R=349/I_n$
	≥ 65	$R=307/I_n$

Определим для схемы рис. 1 величину эквивалентного сопротивления шинопровода в соответствии с поэлементным расчетом

$$R_{\text{экв.ш. по элем}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}{3I_{p,ш}^2} \quad (3)$$

В результате вычислений получено $R_{\text{экв.ш. по элем}} = 55,8$ мОм, где ΔP_i – величина активных потерь мощности для схемы с учетом нагрева проводников и сопротивлений контактов, Вт;

$I_{p,ш}$ – значение расчетного тока шинопровода, А

Вычисленные значения сопротивлений контактных соединений шинопровода без учета и с учетом нагревания проводника и секций шинопровода, а также значения сопротивлений контактов аппаратов представлены в табл 3.

Таблица 3

Значения сопротивлений линий с учетом влияющих факторов при поэлементном расчете

Номер линии на схеме	Сопротивление линии без учета нагрева проводника, мОм	Сопротивление линии с учетом нагрева проводника, мОм	Сопротивление контактов автоматических выключателей, мОм	Сопротивление контактов магнитных пускателей, мОм	Общее суммарное сопротивление участка сети, мОм
Л1	33,2	33,4	116,3	82,5	232,2
Л12	33,2	36,8	21,8	51,6	110,2
Л11	33,2	33,9	34,9	82,5	151,3
Л4	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л3	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л2	33,2	33,4	87,3	82,5	203,2
Л9	33,2	33,4	87,3	82,5	203,2
Л5	33,2	34,6	34,9	82,5	152,0
Л10	33,2	35,7	21,8	51,6	109,1
Л8	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л13	20	22,5	15,4	33,0	70,9
Л7	33,2	34,7	34,9	82,5	152,1
Л6	12,5	14,2	10,9	25,8	50,9
ШР	10,6	12,0	-	-	12,0

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны гистограммы соотношений в величине эквивалентного сопротивления шинопровода значений сопротивлений контактов аппаратов, значений сопротивлений секций шинопровода и линий ответвлений, с учетом их нагревания.

В табл. 4 приведены данные вычислений значений эквивалентного сопротивления схемы и погрешности определения величины эквивалентных сопротивлений по отношению

к значению сопротивления, вычисленного с помощью поэлементного расчета при различном числе присоединенных потребителей.

Результаты расчетов эквивалентного сопротивления схемы и учета влияния таких параметров электрооборудования как нагрев проводников и сопротивления контактов аппаратов показаны в таблице 5 и на рис.3.

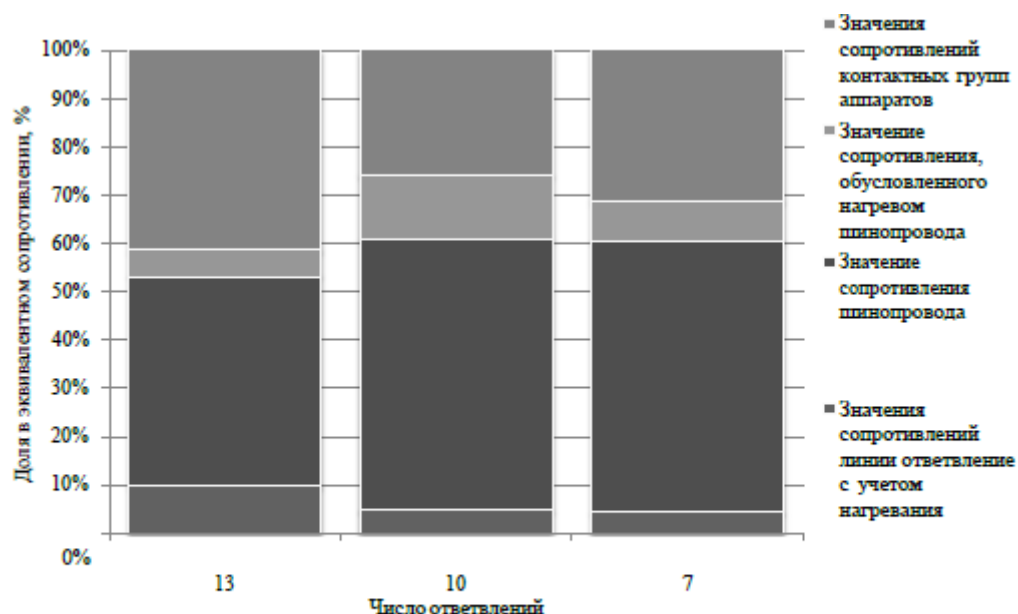


Рис. 2 Соотношение в величине эквивалентного сопротивления шинпровода сопротивлений контактных групп аппаратов, секций шинпровода и линий ответвлений с учетом нагревания проводников и числа ответвлений от шинпровода

Fig. 2 The ratio in the value of the equivalent resistance of the busbar of the resistances of the contact groups of devices, sections of the busbar and branch lines, taking into account the heating of the conductors and the number of branches from the busbar

Таблица 4

Значения эквивалентного сопротивления схемы и результирующая погрешность вычислений			
Число присоединенных потребителей	$R_{\text{экв ш. поэлемент}}$ МОм	$R_{\text{эквив}}$ МОм	Значение погрешности вычислений, %
13	290,7	284,1	-2,9
10	269,3	280,6	4,5
5	298,1	255,0	-14,5

Таблица 5

Оценка значений эквивалентного сопротивления шинпровода и их отклонения от эталонного значения эквивалентного сопротивления

Количество приемников электроэнергии	Без учета нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, МОм	С учетом нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, МОм	С учетом нагрева и сопротивления контактных соединений аппаратов, МОм	Без учета нагрева с учетом сопротивления контактных соединений аппаратов, МОм
13	12,98	14,43	24,60	23,15
10	30,41	36,34	48,96	43,03
5	33,13	35,70	51,84	49,27
Относительная погрешность, %				
13	-47	-41	0	-6
10	-38	-26	0	-12
5	-36	-31	0	-5

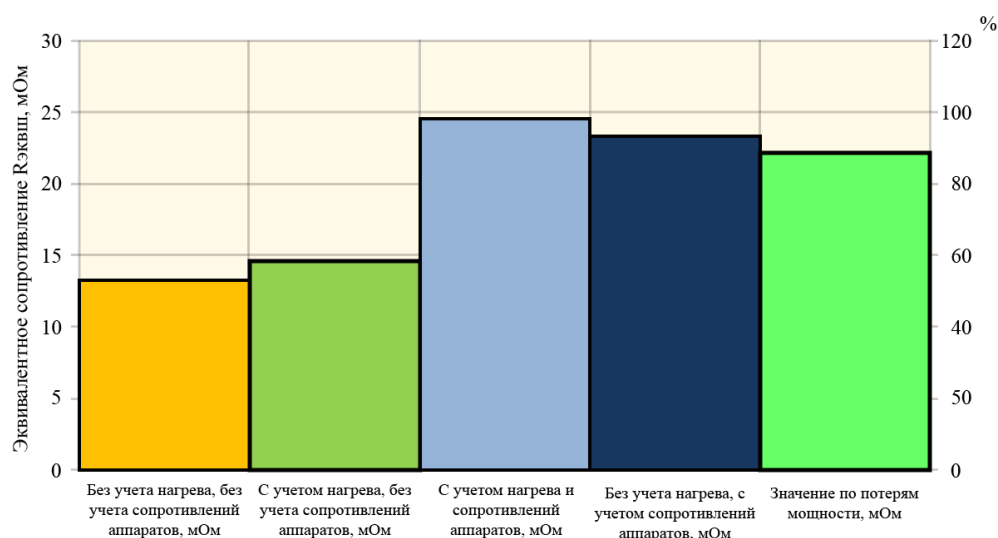


Рис. 3 Учет основных факторов, влияющих на величину эквивалентного сопротивления шинопровода

Fig. 3 Accounting for the main factors affecting the value of the equivalent resistance of the busbar

Рисунок 4 графически иллюстрирует оценку влияния основных параметров оборудования на эквивалентное сопротивление шинопровода:

- процессы нагрева проводников нагрузочным током;
- величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения;
- значения среднеквадратичного коэффициента загрузки линий K_3 .

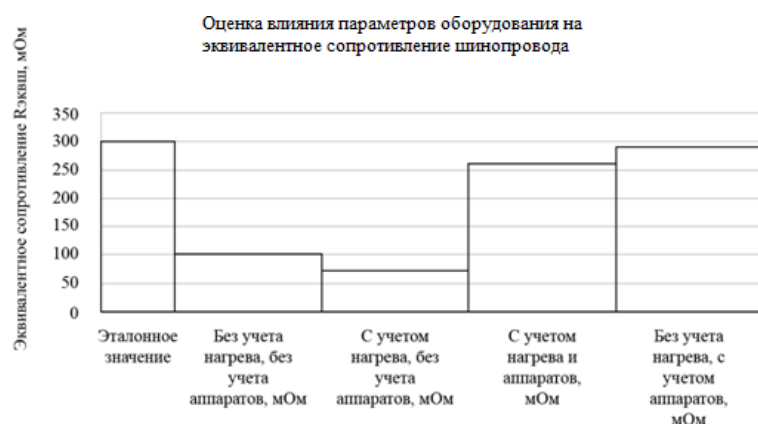


Рис 4. Оценка влияния параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления шинопровода

Fig. 4. Evaluation of the influence of equipment parameters on the value of the equivalent resistance of the busbar

Проведем оценку влияния вида графиков нагрузок на точность расчета потерь ЭЭ. Одним из коэффициентов, характеризующих графики нагрузок, является коэффициент формы K_Φ , определяемый отношением среднеквадратичной мощности $P_{ск}$ электроприемника или группы электроприемников за определенный период времени к среднему значению (P_{cp}) его мощности за тот же период времени:

$$K_\Phi = \frac{P_{ск}}{P_{cp}} \quad (4)$$

где среднее значение мощности приёмника или группы приёмников,

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (5)$$

а среднеквадратичная мощность приёмника или группы приёмников за определенный период времени

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{P_1^2 \Delta t_1 + P_2^2 \Delta t_2 + P_n^2 \Delta t_n}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}} \quad (6)$$

где Δt_i - интервал времени на графике нагрузки,

n - число интервалов.

Вычислим потери электроэнергии участка магистральной схемы:

$$\Delta W = 3 \cdot \kappa_{\phi}^2 \cdot I_{ср}^2 \cdot R_{экви} \cdot T \quad (7)$$

где $R_{экви}$ - значение эквивалентного сопротивления шинпровода;

T - значение расчетного интервала времени;

$I_{ср}$ - средний ток шинпровода;

$\kappa_{\phi} = 1,03$ - значение коэффициента формы, вычисленного в соответствии с графиком рис.4.

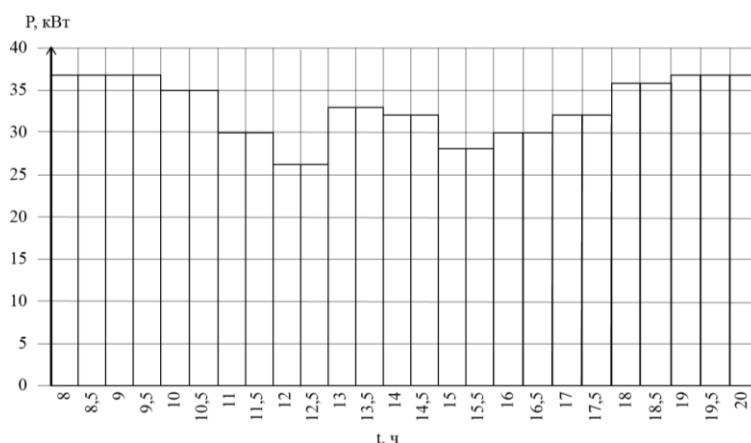


Рис. 5 Вид суммарного графика нагрузок потребителей, присоединенных к шинпроводу *Fig. 5 View of the total load graph of consumers connected to the busbar*

В соответствии с графиком рис. 5 величина потерь ЭЭ составят для шинпровода по выражению (7) для расчетного времени $T=24$ ч с учетом κ_{ϕ} $\Delta W = 2054$ Вт ч, без учета κ_{ϕ} $\Delta W = 2512$ Вт ч. Погрешность вычислений при этом составляет 5,6%.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для повышения достоверности оценки уровня потерь ЭЭ в магистральных схемах цеховых сетей требуется учет таких параметров электрооборудования, как нагревание проводников вследствие протекающего тока и температуры помещений; сопротивлений контактных групп электрических аппаратов, установленных на линиях сети, а также вида графиков нагрузок потребителей. Необходимость учета вышеперечисленных параметров целесообразна для сетей низкого напряжения любой топологии, что подтверждается многочисленными проведенными исследованиями [1-3, 10,12].

Литература

1. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдулгалимов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С. 87-96.
2. 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.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
4. Вохидов А.Д., Дадабаев Ш.Т., Разоков Ф.М. К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема. Надежность. 2016. Т. 16. № 4 (59). С. 36-39.

5. Дадабаев Ш.Т. Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-1. С. 532-536.
6. Petrov T.I., Safin A.R. «Modification of the synchronous motor model for topological optimization» (2020) E3S Web of Conferences, 178, paper № 01016.
7. 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.
8. 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.
9. Busom N. et al. Efficient smart metering based on homomorphic encryption // Computer Communications. 2016. V. 82. pp.95-101.
10. Конюхова Е.А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры). Издательство «Кнорус», 2016.
11. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Y., Safin A.R., et al. An Experimental Bench for the Study of Electric Drives of a Horsehead Pump // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS) ISSN: 1943-023X, V.12, 05-SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298.
12. Конюхова Е.А. Экономико-математическая модель рабочей части системы электроснабжения объекта на среднем и низком напряжении. Электричество. 2018. № 9.
13. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. - Second Edition. CRC Press, 2007.
14. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2019 № 4(40). С. 77-85.
15. Lasso H., Ascanio C., Guglia M.A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. p.1-6.
16. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., et al. Thermal Model of a Linear Electric Machine. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428.
17. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Перспективы применения композиционных проводов в условиях резко континентального климата // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 1. С. 91–97.
18. Тошходжаева М.И. Применение высокотемпературных композиционных проводов в условиях резко континентального климата // Вестник ПИТТУ имени академика М. Осими. Научно-технический журнал. 2017. № 1(2). С. 30–35.

Авторы публикации

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

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

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

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

Логачева Алла Григорьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. 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.
2. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and evaluation of energy savings in the systems of in-plant power supply. *Energy problems*. 2020;2:65-74.
3. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M.: RUSAINS, 2017.168 p.
4. Vokhidov AD, Dadabaev ShT, Razokov FM. On the problems of improving the reliability of the power supply system of the first lift pumping station. *Reliability*. 2016;16;4 (59):36-39.
5. Dadabaev ShT. *Development of a mathematical model of the control system of pumping units of the irrigation station of the first lift*. Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. 2017;9-1:532-536.
6. Petrov TI, Safin AR. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization*. (2020) E3S Web of Conferences, 178, paper № 01016.
7. 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>.
8. Lei C, Tian W, Zhang Y, Fu Ret, 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>.
9. Busom N, et al. Efficient metering based on homomorphic encryption. *Computer Communications*. 2016;82:95-101.
10. Konyukhova EA. *Design of power supply systems for industrial enterprises* (theory and examples). Knorus Publishing House, 2016.
11. Tsvetkov AN, Kornilov VY, Safin AR, et al. An Experimental Bench for the Study of Electric Drives of a Horsehead Pump. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS)* 05-special issue. 2020;V.12:1294-1298. doi: 10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888.
12. Konyukhova EA. Economic-mathematical model of the working part of the power supply system of an object at medium and low voltage. *Electricity*. 2018, No. 9.
13. William H. Kersting *Distribution System Modeling and Analysis. Second Edition*. CRC Press, 2007.
14. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of the KSEU*, 2019;4 (40):77-85.
15. Lasso H, Ascanio C, Guglia M. *A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network*. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. p.1-6.
16. Safin A, Kopylov A, Gibadullin R, et al. *Thermal Model of a Linear Electric Machine*. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia. 2019. pp. 426-428.
17. Tashkhodjaev MI, Hodjiev AA. Prospects for the use of composite wires in the conditions of sharply continental climate. *International techno-economic journal*. 2018;1:91-97.
18. Tashkhodjaev MI. Application of high temperature composite wires in the conditions of sharply continental climate // *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Oshimi. Scientific and technical journal*. 2017;1(2):30-35.

Authors of the publication

Edvard Yu. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

© Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова, А.Г. Логачева

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

Zumeyra M. Shakurova –Kazan State Power Engineering University.

Alla G. Logacheva –Kazan State Power Engineering University.

Получено

08.04.2021 г.

Отредактировано

14.04.2021 г.

Принято

29.04.2021 г.



АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Р. Сафин¹, Ranjan Kumar Behera²

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Indian Institute of Technology (IIT), Patna

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, sarkazan@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть технологии изготовления постоянных магнитов и области их применения. Выявить мировые тренды по изменению спроса на редкоземельные металлы. Изучить перспективы развития аддитивного производства полимерных магнитных материалов. МЕТОДЫ. При изучении данного вопроса использовался анализ широкого круга отечественных и зарубежных источников научной литературы. РЕЗУЛЬТАТЫ. Изучены перспективные технологии аддитивного производства полимерных магнитных материалов для различных сфер применения. Обозначена необходимость установить взаимосвязь между свойствами исходного материала, диаметрами экструзионных сопел, параметрами печати, а также механическими и функциональными свойствами получаемых магнитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье представлен всесторонний обзор последних достижений в области применения аддитивного производства, оптимизации топологии и их интеграции для электрических машин и их магнитных компонентов. Технологии аддитивного производства, такие как 3D-печать, ВААМ – технология имеют потенциальные преимущества, такие как снижение производственных затрат, устранение необходимости в изготовлении пресс-форм, возможность создавать постоянные магниты с полевыми профилями и магнитными свойствами, которые невозможно получить с помощью современных методов. Рассмотренные технологии могут использоваться в качестве инструмента при проектировании и разработке инновационных магнитов для электрических двигателей, которые позволят наиболее полно использовать магнитный поток и тем самым повысить энергоэффективность приводных систем. Это позволит быстро создавать прототипы деталей и уменьшит время выхода на рынок новых продуктов.

Ключевые слова: аддитивные технологии; постоянные магниты; 3D принтер; оптимизация; электрические машины.

Для цитирования: Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 14-33. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.

ADDITIVE MANUFACTURING AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MAGNETIC MATERIALS FOR ELECTRICAL MACHINES

AR. Safin¹, Ranjan Kumar Behera²

¹Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

²Indian Institute of Technology (IIT), Patna

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, sarkazan@bk.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the technologies for the manufacture of permanent magnets and their areas of application. To identify global trends in the change in demand for rare earth metals. To study the prospects for the development of additive production of polymer magnetic materials. METHODS. When studying this issue, an analysis of a wide range of domestic and foreign sources of scientific literature was used. RESULTS. Prospective technologies for the additive production of polymer magnetic materials for a variety of

applications have been studied. The need to establish a relationship between the properties of the starting material, the diameters of the extrusion nozzles, the printing parameters, as well as the mechanical and functional properties of the resulting magnets is indicated. **CONCLUSION.** This article provides a comprehensive overview of recent advances in the application of additive manufacturing, topology optimization and their integration for electrical machines and their magnetic components. Additive manufacturing technologies such as 3D printing, BAAM - the technology has potential advantages such as lower production costs, elimination of the need to make molds, the ability to create permanent magnets with field profiles and magnetic properties that cannot be obtained using modern methods. The considered technologies can be used as a tool in the design and development of innovative magnets for electric motors, which will make the most of the magnetic flux and thereby increase the energy efficiency of drive systems. This will allow rapid prototyping of parts and reduce the time to market for new products.

Keywords: additive technologies; permanent magnets; 3D printer; optimization; electrical machines.

For citation: AR. Safin, Ranjan Kumar Behera. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):14-33. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.

Введение

Магниты применяются во многих областях, значительно улучшая повседневную жизнь (рис. 1). Основная доля выпускаемых магнитов используется в производстве электродвигателей и генераторов [1].

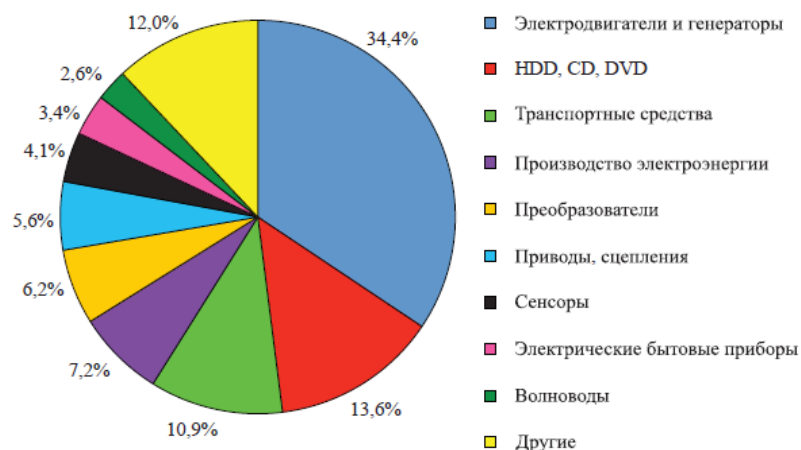


Рис. 1. Области применения редкоземельных магнитов *Fig. 1. Applications of rare earth magnets*

Однако рынки сбыта магнитов оценивают не только по достигнутому уровню производства, сколько по развивающимся направлениям и будущему потенциалу. В этом направлении несомненным лидером являются ветряные электрогенераторы, производство которых стремительно возрастает. Массовое производство томографов, звуковых устройств, магнитной компьютерной памяти, сенсоров и переключателей создает значительные потребности в высококачественных магнитах (рис. 2) [2].

Стремительное развитие высокотехнологичных производств влечет за собой существенный прирост запросов промышленности на постоянные магниты. Основная доля требуемых магнитов производится из сплавов, содержащих Nd (неодим). Безусловным лидером как в производстве таких магнитов, так и в добыче редкоземельных металлов (РЗМ) является Китай. Именно на территории Китая находятся главные мировые запасы редкоземельных элементов, а доля производства редкоземельных оксидов составляет 97%.

Этим обстоятельством вызвано возникновение новых направлений исследований, преследующих цель создать магниты, не содержащие редкоземельные элементы, однако аналогичные по физическим характеристикам или даже превосходящие магниты на основе NdFeB.

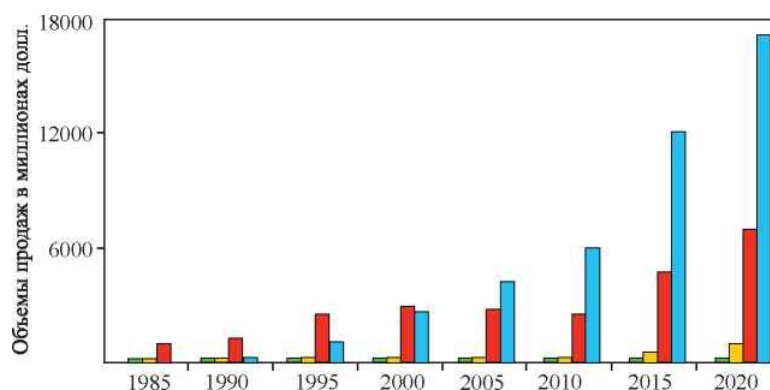


Рис.2. Рост спроса на редкоземельные магниты AlNiCo (■), SmCo (■), ферриты (■) и NdFeB (■)

Fig. 2. Growth in demand for rare earth magnets AlNiCo (■), SmCo (■), ferrites (■) and NdFeB (■)

Стремительное развитие высокотехнологичных производств влечет за собой

Однако производство объемных жестких магнитов вряд ли можно осуществить, полностью отказавшись от РЗМ. Основная идея удешевления магнитов и ослабления зависимости рынка от Китая заключается в попытках уменьшения доли РЗМ, путем создания дополнительной магнитной анизотропии, с помощью обменного взаимодействия между «мягкими» и «жесткими» магнитными фазами. При размерах включений «мягкой» фазы ниже определенного критического размера упомянутые композиционные материалы проявляют вполне приемлемые значения остаточной намагниченности и называются *exchange-spring materials* [3].

Евросоюз, Япония и США определили редкоземельные металлы как материалы огромной стратегической важности [4], значительно увеличив в последние годы количество исследовательских проектов и лабораторий, преследующих цель изготовить материалы с конкурентоспособной магнитной энергией, при этом избегая расширения в использовании редкоземельных элементов.

Аддитивное производство имеет много преимуществ по сравнению с традиционными методами производства и все чаще используется в медицине, авиакосмической и автомобильной промышленности. Гибкость технологий аддитивного производства для изготовления изделий сложной геометрии из меди, полимеров и магнитных металлов открывает уникальные возможности для новых концепций дизайна и повышения удельной мощности машин без значительного увеличения стоимости производства и прототипирования. Оптимизация топологии исследует оптимальное распределение одного или нескольких материалов в пределах определенного пространства проектирования и может привести к уникальной геометрии, которую невозможно реализовать с помощью традиционных методов оптимизации. В качестве перспективной технологии аддитивное производство дает разработчикам оборудования возможность преодолеть текущие производственные ограничения, препятствующие внедрению оптимизации топологии. Успешная интеграция аддитивного производства и оптимизации топологии для изготовления магнитных компонентов для электрических машин может открыть новые инструменты для разработчиков электрических машин.

Материалы и методы

Неодим-железо-бор магниты основаны на сплаве $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, в которых расчетное содержание редкоземельных элементов составляет около 27%. Однако в дополнение к неодиму в сплаве часто используются празеодим, диспрозий и другие элементы, такие как кобальт. Это приводит к среднему содержанию редкоземельных элементов до 31% [5]. Празеодим в основном используется для частичной замены более дорогого неодима, что, согласно [6], возможно при соотношении смешивания 3: 1 (Nd:Pr) без потери качества. Добавление диспрозия служит для увеличения напряженности коэрцитивного поля при высоких температурах и имеет большое значение для устройств работающих при больших температурах. Магниты NdFeB без диспрозия остаются стабильными только по своим магнитным свойствам до температур примерно 80°C , добавление диспрозия до 10% [7] может увеличить рабочий температурный диапазон до 200°C . Состав магнитов варьируется соответственно в зависимости от области применения: Магниты NdFeB при низких рабочих температурах (например, в громкоговорителях) обычно содержат 31% неодима и празеодима (и не содержат диспрозия), а в магнитах для более высоких

температурных диапазонов (например, электродвигателей) празеодим заменен диспрозием. Магниты NdFeB достигают плотности энергии до 400 кДж / м³, что делает их самыми сильными постоянными магнитами.

По способу производства различают полимерные и спеченные магниты NdFeB. Магниты NdFeB с полимерной связкой изготавливаются из наноразмерного порошка NdFeB, который прессуется в желаемую форму с помощью полимера. Связанные полимерами магниты NdFeB имеют заметно меньшую плотность энергии, чем спеченные магниты NdFeB. Преимуществами являются простота обработки (например, литье под давлением), изменяемая форма и значительно улучшенная коррозионная стойкость. Полимерные магниты NdFeB используются главным образом для задач, где не требуются большие значения остаточной индукции, например, в двигателях постоянного тока для оптических приводов и жестких дисков. Состав материала магнитного сплава в полимерных магнитах обычно очень однороден с 29% неодима без добавления празеодима или диспрозия. Спеченные магниты NdFeB также изготавливаются из порошкообразного сырья. Однако компоненты не склеиваются связующим, а спекаются при высоком давлении и температуре. Поскольку спеченные магниты NdFeB очень восприимчивы к коррозии, они покрыты антикоррозионной защитой (например, никелированием).

Сферы применения. Электроника

В электронике магниты NdFeB в основном используются в небольших двигателях (например, в оптических приводах, жестких дисках и вибрационных сигналах), а также в некоторых громкоговорителях. В целом, по оценкам, около 10% общего производства магнитов NdFeB используется для приложений для оптических и акустических устройств (информационная, коммуникационная и развлекательная электроника) [8].

Автомобильная отрасль

Редкоземельные магниты используются во многих устройствах автомобилей. К ним относятся, например, высококачественные динамики, системы рулевого управления с усилителем, датчики и небольшие двигатели. Что касается автомобилей с гибридными и электрическими приводами, запрос на высококачественные магниты будет увеличиваться, так как эти приводы в основном содержат двигатели с NdFeB (спеченные магниты). В целом, будущая потребность в этой отрасли сильно зависит от развития продаж гибридных и электромобилей. Вес магнитов в трансмиссии для гибридных и полностью электрических автомобилей составляет от 1 кг до 2,4 кг в зависимости от размера и мощности электродвигателя. К 2030 году Европейский союз планирует выпустить на дороги не менее 30 млн электрокаров [9].

В зависимости от глобального развития рынка различных трансмиссий для электромобилей в секторе легковых автомобилей, можно предположить значительный рост спроса на магниты NdFeB и, таким образом, на неодим, празеодим и диспрозий. Для снижения ценового уровня проводятся исследования в направлении магнитов NdFeB с более низким содержанием диспрозия (7% или даже меньше) [10]. В дополнение к автотранспортным средствам электрические велосипеды также превращаются в значительных потребителей магнитов NdFeB. Масса магнитов на колесо составляет 300 г при этом содержание Nd составляет 30% и содержание диспрозия 4% [11].

Ветрогенераторы

Уже несколько лет используются безредукторные ветряные турбины, которые работают с синхронными генераторами, оснащенными постоянными магнитами. В отличие от «классических» приводов для ветряных турбин, которые работают с коробками передач, этот тип привода особенно подходит для больших диапазонов мощности (например, систем мощностью 6 МВт). Безредукторный привод обещает ряд преимуществ (экономия веса, меньший объем технического обслуживания и т. д.) особенно для использования в морских зонах. Потребность в магнитах NdFeB для этой технологии высока, предполагается, что от 500 до 600 кг на МВт выходной мощности, т.е. большие ветряные турбины (6 МВт) этого типа оснащены тремя-четырьмя тоннами магнитов NdFeB [12]. Для поддержания температурной стабильности диспрозий также включен в магнитный сплав для этой области применения. Драйвером роста спроса на редкоземельные элементы (особенно неодим, празеодим, диспрозий) для ветряных турбин становятся комплексные планы правительства Китая по расширению ветроэнергетики, в том числе в морских зонах. Китай планирует довести мощности солнечной и ветровой энергетики до 1200 ГВт к 2030 году [13].

Также магниты NdFeB все чаще используются во многих других применениях. К ним относятся магнитно-резонансная томография в медицине, современные лифтовые

системы, энергоэффективные стиральные машины, системы кондиционирования воздуха и тепловые насосы. Магниты NdFeB играют очень важную роль для различных военных применений [14], например, генераторы и электроприводы в системах управления ракетами и артиллерийскими системами, в приборах ночного видения, радио- и гидролокации, лазерных системах.

Аддитивное производство постоянных магнитов

Аддитивное производство - это быстро развивающаяся технология для полимерных магнитов. Технологии аддитивного производства, такие как 3D-печать, имеют потенциальное преимущество, позволяющие снизить производственные затраты, устраняя необходимость в изготовлении пресс-формы. Это позволяет быстро создавать прототипы деталей и уменьшает время выхода на рынок новых продуктов. Путем модификации термопластичного пластика с частицами магнитотвердого наполнителя можно изготавливать постоянные магниты на полимерной связке. В качестве твердых магнитных частиц вводят феррит, а также редкоземельные материалы с объемным содержанием наполнителя от 45% до 65%. Сначала полимер и магнитные частицы смешиваются в экструдере. Затем полученное соединение может быть дополнительно обработано литьем под давлением и экструзией соответственно.

В работе [15] представлена технология 3D-печати изотропных жестких магнитов на полимерной связке с помощью недорогого 3D-принтера. Представлен пример печатного магнита сложной формы, который был разработан для генерации определенного поля рассеяния, и сопоставлен с конечно-элементным моделированием. Данная технология позволяет печатать магнитные системы на полимерной связке имеющие сложную форму с локально настроенными магнитными свойствами. Порошок NdFeB для полимерных магнитов получен методом прядения из расплава, что позволяет получить сферический порошок с размером частиц приблизительно 45 мкм, который обычно предпочтителен в процессах литья под давлением для достижения лучшего реологического поведения. В тех случаях, когда максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$ связанных магнитов не является целевой характеристикой, предпочтительным является магнитно-изотропный порошок, поскольку он имеет более низкие затраты на изготовление и большую гибкость.

Представленный метод может быть использован для печати магнитов, состоящих из локально различных материалов полимерной матрицы, а также из различных магнитных порошков, начиная от магнитомягких сплавов до магнитотвердых NdFeB или ферритовых сплавов. Способность печатать магниты из локально изменяющихся магнитных материалов с индивидуальными магнитными свойствами позволяет создавать постоянные магниты с полевыми профилями и магнитными свойствами, которые невозможно получить с помощью современных методов.

Повторное использование редкоземельных элементов, таких как Sm и Nd, является одним из методов, направленных на смягчение долгосрочных проблем с поставками и стоимостью материалов и устройств, которые зависят от этих элементов. В работе [16] переработанный порошок Sm-Co восстановлен из промышленных отходов после обработки магнитов. Исследована возможность повторного использования сырья при подготовке нити для 3D-печати магнитов на полимерной основе. В данном исследовании вторичный порошок Sm-Co, извлеченный из стружек, смешивали с полимолочной кислотой, с температурой плавления 178 °C, которая была выбрана в качестве связующего для этого исследования, поскольку её температура плавления значительно ниже температуры Кюри Sm-Co. Далее полученную смесь экструдировали при 160 °C для получения нити. Показано, что не произошло ухудшения магнитных свойств при приготовлении и экструзии полимерного магнитного материала. Хорошая однородность магнитных свойств проявляется по всей нити, за исключением начального участка выдавливаемого материала. Данная работа открывает путь для производства переработанной магнитной нити для 3D-печати постоянных магнитов. Поставка самария (Sm) в настоящее время не считается критической. Тем не менее, перебои с поставками могут произойти с внедрением технологий со значительной долей Sm, таких как Sm-Fe-N. Повторное использование переработанных магнитов в качестве порошков в магнитах один путь к сохранению материалов и переработке важнейших РЗМ.

Полимерные магниты составляют наиболее быстро растущий сегмент рынка постоянного магнита. Полимерный ферритовый магнит идеально подходит для применений, где необходимо точно комбинировать недорогой магнит со сложной формой. Однако магнитные свойства полимерного ферритового магнита являются самыми низкими среди коммерческих постоянных магнитов. Полимерный магнит NdFeB

более дорогой по весу, но обеспечивает приемлемые магнитные свойства для экономически эффективных применений. Одновременное использование двух совершенно разных магнитных материалов позволяет создавать самые разнообразные полимерные соединения магниты. Смесь NdFeB и феррита может быть перспективной для производства гибридных магнитов со сниженной стоимостью [17]. Изучена возможность создания гибридного магнита с промежуточным или улучшенным магнитными свойствами путем смешивания различных материалов.

Развивается новый метод производства полимерных магнитов с большой площадью поверхности *Big Area Additive Manufacturing (BAAM)* - для изготовления изотропных магнитов на основе NdFeB, имеющих форму сетки, с магнитными и механическими свойствами, сопоставимыми или лучше, чем у традиционных литевых магнитов [18]. Композиционные гранулы с исходным полимерным магнитом состоят из 65 % изотропного порошка NdFeB и 35 % полимера (рис. 3). Данный метод предлагает значительные преимущества, такие как эффективность (не требуются инструменты), не требует предварительной подготовки филамента (нити для 3D принтера), быстрая скорость (простая процедура) и возможность производить неограниченное количество деталей в размерах и формах. *BAAM* технология обеспечивает эффективный метод реализации произвольной формы с минимальной стоимостью и отходами, и может ускорить развитие крупномасштабного промышленного производства магнитов на полимерной основе.

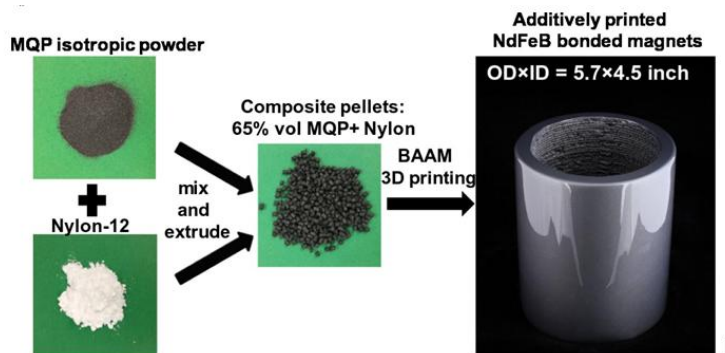


Рис. 3 Способ изготовления полимерного магнита [18]

Fig. 3 Method of manufacturing a polymer magnet [18]

В работе [19] сравниваются две технологии 3D-печати, а именно струйная печать и *BAAM* –технология, чтобы определить их применимость при изготовлении магнитов на основе Nd-Fe-B. Показано, что аддитивные технологии страдают от недостаточной точности из-за искажения и накопления остаточного напряжения во время процесса наслоения [20]. Для обеспечения качества изготовления необходимо установить прямую связь между свойствами исходного материала, диаметрами экструзионных сопел, параметрами печати, а также механическими и функциональными свойствами получаемых деталей, необходимы значительные усовершенствования, чтобы заменить традиционные методы изготовления деталей большого объема относительно простой формой. Аддитивные технологии нуждается в значительном прогрессе, чтобы заменить традиционные методы изготовления деталей большого объема. *BAAM* технология более перспективна по сравнению со струйной печатью с точки зрения производства деталей, механических и магнитных свойств деталей, который может превзойти по эффективности прессование. Тем не менее, аддитивные технологии можно использовать в качестве инструмента при проектировании и разработке инновационных магнитов для электродвигателей, при этом лучшая конструкция электродвигателя, позволяющая наиболее полно использовать магнитный поток, в свою очередь, снизила бы потребление редкоземельных материалов. Более того, электродвигатель, который состоит из немагнитных рам (например, статора, ротора и т. д.) и постоянных магнитов, может быть напечатан как единая деталь, что обеспечивает более высокую точность и более короткое время от проектирования до конечной детали.

В настоящее время в синхронных двигателях с постоянными магнитами обычно используются спеченные магниты NdFeB из-за их самой высокой остаточной плотности магнитного потока. Однако высокая электропроводность спеченных магнитов приводит к значительным потерям на вихревые токи, что снижает КПД двигателя [21]. Результаты моделирования и эксперименты продемонстрировали, что двигатель с осевым магнитным

потоком, использующий полимерные магниты NdFeB, может достигать как более высокого крутящего момента, так и более высокого КПД по сравнению с двигателем с радиальным магнитным потоком, со спеченными магнитами NdFeB с таким же весом магнитов [22]. Данная работа еще раз подтверждает необходимость в разработке передовых производственных технологий, таких как 3D-печать, для изготовления полимерных магнитов. Важно отметить, что методы 3D-печати, обсуждаемые с этой точки зрения, не являются исключительными для магнитов на основе NdFeB, возможно применение широкого спектра магнитных материалов и композиций.

Кроме того, электрическая машина, которая состоит из немагнитных рам (например, статор, ротор и т. д.) и постоянных магнитов, может быть напечатана как единая деталь, что обеспечивает более высокую точность и уменьшение времени проектирования.

Последние технологические достижения в области аддитивных технологий (АТ) позволяют использовать широкий спектр материалов, включая медь [23, 24], керамику и магнитные материалы [25]. Эти материалы являются ключевыми для производства компонентов электрических машин. Для очень сложных форм АТ могут предоставить наиболее экономичные и быстрые средства для изготовления небольших опытных партий.

Топологическая оптимизация (ТО) используется во многих областях электротехники для определения новых конструкций, снижающих вес без нарушения механической целостности. ТО определяет оптимальный способ распределения одного или нескольких материалов в определенном пространстве проектирования. В результате ТО часто возникают сложные конструкции. Применение ТО просматривается в конструкции сердечника ротора реактивной машины [26]. ТО также используется для поиска оптимального распределения постоянного магнита и стального сердечника ротора в машинах с постоянными магнитами [27, 28].

Одним из недостатков конструкций полученных на основе ТО является низкая технологичность найденных оптимальных решений. Это препятствовало принятию ТО при проектировании электрических машин. Однако применение АТ к компонентам электрических машин, особенно в ферромагнитных материалах и постоянных магнитах, дают возможность технически реализовать решения полученные на основе ТО. Поскольку АТ могут изготавливать практически любую сложную топологию, стало ясно, что ТО и АТ имеют высокий уровень совместимости и могут использоваться параллельно для облегчения разработки электрических машин следующего поколения. В работе [29] ТО используется для проектирования сердечника ротора машины с постоянными магнитами. Затем оптимизированный сердечник ротора печатается на 3D-принтере из высококремнистой стали. В работе [30] постоянные магниты разных марок предлагаются для изготовления электрической машины, чтобы снизить производственные затраты без ухудшения КПД машины. В работе [31] обсуждается современное состояние аддитивного производства электрических машин и их компонентов, включая магнитные материалы и обмотки. В статье [32] широко обсуждаются применение технологий АТ для компонентов электрических машин, в том числе железных сердечников, обмоток и систем изоляции, магнитов и систем управления теплообменом. Дается общее представление о характеристиках компонентов, напечатанных на 3D-принтере и они сравниваются с компонентами, производимыми традиционным способом. В [33] обсуждаются преимущества АТ в отношении конструкции и сборки электрических машин.

Магнитомягкие материалы характеризуются низкой собственной коэрцитивной силой, обычно ниже 1000 А/м, и могут легко намагничиваться или размагничиваться [34]. Поскольку железные сердечники отвечают за направление и улучшение основного потока, создаваемого непрерывно движущимся магнитным полем, существует несколько критериев при выборе магнитомягких материалов на этапе проектирования. Следующие характеристики считаются ключевыми для стальных сердечников: магнитное насыщение, собственная коэрцитивная сила, относительная магнитная проницаемость, плотность гистерезисных потерь, динамические потери и предел текучести [35]. Для электрических машин сердечники традиционно изготавливаются либо из стальных пластин, либо из магнитомягких композитов (SMC материалы). Для шихтованных сердечников количество стальных отходов из-за резки и пробивки пластин может составлять от 50% до 80% [36].

В отличие от шихтованных сердечников, SMC материалы выбираются для топологий машин, где предпочтительным является магнитный поток распределенный в трех направлениях [37]. Эти топологии машин могут включать в себя машины с осевым потоком, трубчатые линейные машины или машины с зубчатыми полюсами. Поскольку

железные сердечники, изготовленные из *SMC*, производятся путем прессования частиц железа в желаемые формы, это может потребовать меньше этапов механической обработки и постобработки. Еще одно преимущество *SMC* материалов по сравнению с шихтованной сталью состоит в том, что магнитомягкие композиты имеют более низкие потери на вихревые токи на высоких частотах возбуждения. При частоте возбуждения 1000 Гц и выше потери на вихревые токи в сердечнике *SMC* намного ниже, чем в сердечнике из многослойной стали. Это дает преимущества *SMC* для конструкций электрических машин, где требуется высокая скорость работы. Однако существуют заметные проблемы, связанные с применением *SMC*. Они подвержены высоким гистерезисным потерям, высокой собственной коэрцитивной силе, низкой относительной проницаемостью и низкому пределу текучести. Типичное значение предела текучести *SMC* ниже 20 МПа, в то время как для шихтованной стали типичное значение составляет около 350 МПа. Для высокоскоростных электрических машин сердечники ротора, изготовленные из *SMC*, могут подвергаться высоким механическим напряжениям.

Многочисленные демонстрации аддитивного производства сердечника ротора синхронного реактивного электродвигателя показаны в [38, 39]. Изготовление прототипов сердечников ротора достигается с помощью двух методов 3D-печати: моделирования наплавлением (*FDM*) и селективного лазерного плавления (*SLM*) без использования формования или инструментов. В [40] анализируется поверхность сердечника ротора реактивной машины с изменяемым сопротивлением, напоминающая структуру сот. Использование сотовой структуры позволяет уменьшить как пульсацию крутящего момента, так и потоки рассеяния (рис. 4).



Рис. 4. Сердечники ротора, изготовленные добавкой. Эти конструкции изготавливались без литья и оснастки.

- (а) Напечатанный сердечник ротора для синхронно-реактивной машины [39];
- (б) Напечатанный сердечник ротора для реактивной машины с изменяемым сопротивлением [40]

Fig. 4. Rotor cores made by the additive. These structures were made without casting and tooling.

- ((a) Printed rotor core for synchronous-reactive machine [39];
- (b) A printed rotor core for a reactive machine with variable resistance [40].

В электрических машинах обычно используются три магнитомягких материала: сплавы железо-кобальт (*FeCo*), железо-никель (*FeNi*) и железо-кремний (*FeSi*). Что касается производительности в расчете на стоимость, варианты железо-кремниевой электротехнической стали имеют высокое магнитное насыщение, высокую максимальную относительную проницаемость, низкую собственную коэрцитивную силу, низкие гистерезисные потери и низкие потери на вихревые токи до сотен Гц на частоте возбуждения. Таким образом, варианты железо-кремниевой электротехнической стали можно найти в большинстве железных сердечников, используемых в электрических машинах [35]. В поисках железных сердечников аддитивного производства большая часть исследований и разработок ферромагнитных материалов, напечатанных на 3D-принтере, также сосредоточена на железо-кремнии.

Подобно 3D-печати железо-кобальт и железо-никель, *SLM* является наиболее часто используемым процессом АТ для железо-кремния. В [41] *SLM* предлагается в качестве альтернативного метода производства железо-кремния с содержанием кремния 6,9 мас.%, который является хрупким и сложным для производства с помощью обычного способа производства. Здесь исследование параметров печати *SLM* на магнитных свойствах показывает, что существует нелинейная зависимость между подводимой лазерной энергией и относительной проницаемостью, собственной коэрцитивной силой и общей плотностью потерь напечатанного железо-кремния. Таким образом, важно оптимизировать процесс печати, чтобы получить оптимальные магнитные

характеристики печатного железо-кремния. Однако природа метода *SLM* вносит дефекты и остаточные напряжения в микроструктуру печатных деталей, что ухудшает магнитные свойства железо-кремния на основе *SLM*. По сравнению с коммерческой сталью с ламинированным железом и кремнием максимальная относительная проницаемость железо-кремния, полученного методом *SLM*, ниже [41, 42]. Применение термообработки к готовым деталям может помочь снять остаточные напряжения и значительно улучшить относительную проницаемость, а также другие магнитные свойства железо-кремниевых сплавов *SLM* [43]. В [44] показано, что процесс отжига улучшает максимальную относительную проницаемость готовых деталей со значения 2000 до 24000, что соответствует высокопроизводительным слоям железо-кремнистой стали. На другие магнитные свойства, включая общую плотность потерь в железе, собственную коэрцитивную силу и насыщение, также оказывает положительное влияние процесс отжига. Другой интересной особенностью процесса *SLM* является то, что он вводит удлинение зерна в направлении построения печатных деталей. В результате железо-кремний, изготовленный с использованием *SLM*, может иметь высокий уровень магнитной анизотропии [45]. Кроме того, более высокая подводимая энергия лазера может даже изменить кристаллографическую текстуру напечатанного железо-кремния, что приведет к образованию текстуры Госсса, также известной как текстура куба, которая наблюдается в текстурированной электротехнической стали [46]. Это говорит о том, что *SLM* потенциально может быть использован в качестве альтернативного подхода при производстве железо-кремния с ориентированной структурой зёрен, который, в свою очередь, может быть использован для таких областей, как трансформаторы или электрические машины.

К постоянным магнитам, используемым в электрических машинах, предъявляются три основных требования: высокие функциональные магнитные свойства; стабильность при высоких температурах; коррозионная стойкость. Что касается магнитных свойств, к важным характеристикам относятся остаточная магнитная индукция B_r , собственная коэрцитивная сила H_{ci} и максимальное произведение энергии $(BH)_{max}$. Постоянными магнитами, которые обычно используются в электрических машинах, являются NdFeB, AlNiCo, SmCo и ферритовые магниты. Однако использование критически важных редкоземельных элементов, таких как Dy и Nd, может увеличить стоимость магнитов на основе NdFeB и ограничить поставки. Уменьшая использование редкоземельных элементов, можно снизить стоимость магнита и разнообразить линейку магнитов.

Процесс производства спеченных постоянных магнитов включает измельчение сплавов в мелкий порошок и выравнивание частиц порошка в сильном внешнем магнитном поле. Затем выровненные частицы порошка уплотняются посредством холодного изостатического прессования или других методов прессования. Далее сырая часть спекается, подвергается термообработке и механической обработке для придания желаемой геометрии. Для связанных магнитов порошки магнитных сплавов смешивают с полимерами, а затем формируют в желаемые формы путем сжатия или литья под давлением. Аддитивное производство потенциально может обеспечить как устойчивость, так и снижение затрат при производстве магнитов, а также сократить этапы механической обработки и создание сложных геометрических форм без использования пресс-форм. На данном этапе магнитные свойства магнитов на связке из NdFeB, напечатанных на 3D-принтере, во многом сравнимы со свойствами промышленных магнитов на связке NdFeB [47]. Эти промышленные магниты обычно производятся методом литья под давлением (IM). Однако магнитные свойства напечатанных магнитов зависят от технологии печати, плотности напечатанных деталей и химического состава нити или порошковой смеси, используемой в 3D-печати.

Технология порошкового слоя на основе *SLM* технологии перспективна при печати на магнитах с плотностью выше 90% [48]. В этом процессе АТ на основе лазера может вызывать значительные трещины и остаточные напряжения в печатных магнитах, которые могут отрицательно повлиять на магнитные и механические свойства магнитов. Таким образом, оптимизация параметров лазера, таких как правильный выбор скорости сканирования и мощности лазера, может привести к оптимальным характеристикам магнитных свойств печатных магнитов. Кроме того, оптимизация шаблона лазерного сканирования также может помочь в практическом распределении тепла внутри печатного магнита, что может помочь улучшить его общие характеристики. Заявленная магнитная индукция напечатанного на основе лазера магнита составляет около 0,55 Т.

Для печати магнитов NdFeB широко исследуются технологии экструзии материалов и струйной печати связующего, в которых не используется лазер в качестве

источника энергии. Магнитные свойства NdFeB, полученного с помощью *BJP* технологии, имеют аналогичные свойства по сравнению с NdFeB, полученным с помощью метода наплавленного осаждения (*FDM*), технологии в рамках экструзии материалов, как показано в [49]. У них схожие характеристики по плотности, остаточной плотности потока и собственной коэрцитивности [50]. Магниты, изготовленные с помощью *BJP* технологии, имеют значение плотности около 3,5 г / см³, что примерно выше 40% от теоретической плотности NdFeB. Одной из текущих проблем при изготовлении магнитов с помощью *BJP* является увеличение объемного содержания порошка NdFeB в печатных деталях, что может помочь улучшить плотность магнита и остаточную магнитную индукцию. Проникновение сплавов NdCuCo и PrCuCo в магниты *BJP* в исходном состоянии может помочь улучшить плотность и механическую целостность магнитов и внутреннюю коэрцитивную силу, как показано в [51].

Однако магниты из NdFeB, изготовленные с помощью *BAAM* технологии, превосходят магниты, изготовленные с использованием других технологий печати [52]. Плотность магнитов *BAAM* примерно на 20% выше по сравнению с магнитами *BJP*, в то время как плотность остаточного потока и максимальное произведение энергии на 20% и 40% лучше соответственно. Магнитные свойства магнитов *BAAM* могут быть дополнительно улучшены за счет более высокого объемного процентного содержания магнитного порошка, используемого в смеси для печати [53]. Прямое сравнение с коммерческими литыми под давлением магнитами NdFeB показывает конкурентоспособные характеристики магнитов *BAAM* с точки зрения собственной коэрцитивной силы, остаточной плотности потока и произведения энергии магнита. Тепловые характеристики магнитов *BAAM* также демонстрируют аналогичное поведение по сравнению с магнитами, изготовленными литьем под давлением. Ухудшение характеристик магнита *BAAM* в зависимости от температуры показывает аналогичную отрицательную тенденцию при повышении температуры окружающей среды. Краткое сравнение текущего состояния магнитных свойств для различных технологий аддитивного производства, а также магнитов, полученных литьем под давлением, показано в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение характеристик промышленных полимерных магнитов и магнитов из NdFeB, изготовленных на основе АТ.

Метод изготовления	Плотность (г/см ³)	B _r (Т)	H _{ci} (кА/м)	(BH) _{max} (МГсЭ)
<i>IM</i>	3,85-5,7	0,22-0,68	135-463	3,3-9,4
<i>BJP</i>	3,3-3,86	0,3-0,42	700-1100	2,4-3,8
<i>BAAM</i>	4,9-5,2	0,51-0,58	688-708	5,3-5,47
<i>FDM</i>	3,53	0,3	990	-

Исследования аддитивных магнитов из AlNiCo показывают многообещающие результаты для их применения в электрических машинах. Магниты из AlNiCo, напечатанные на 3D-принтере с помощью технологии LENS, могут достигать максимального энергетического продукта (BH)_{max} со значениями от 48% до 66,7% по сравнению с промышленными спеченными или литыми магнитами из AlNiCo [54]. Что касается собственной коэрцитивной силы напечатанных магнитов из AlNiCo, она эквивалентна коммерческим магнитам из AlNiCo и варьируется от 140 кА / м до 160 кА / м. Остаточная магнитная индукция B_r печатных магнитов из AlNiCo варьируется от 0,75 Тл до 0,92 Тл, что примерно на 10-15% ниже, чем обычно значения, встречающиеся в коммерческом AlNiCo. Эти первые результаты показывают конкурентоспособность 3D-печати как альтернативного процесса производства постоянных магнитов AlNiCo. Здесь оптимизация процесса печати, а также дальнейшие исследования состава материалов могут потенциально производить аддитивно производимый AlNiCo с магнитными свойствами, превышающими коммерческие эквиваленты. Одним из ключевых преимуществ магнитов AlNiCo является то, что максимальное значение (BH) AlNiCo может оставаться относительно постоянным при температурах до 300 ° С. Таким образом, возможность иметь альтернативную технологию изготовления магнитов AlNiCo выгодна для области электрических машин, где высокая рабочая температура является важным фактором.

Формование магнитных структур для электрических машин обычно можно разделить на две группы: традиционные методы оптимизации и оптимизация топологии.

Для традиционных методов расчета математические модели и анализ чувствительности обычно используются на предварительно выбранном геометрическом шаблоне электрической машины [55, 56]. Традиционная оптимизация, которая обычно основана на эволюционных алгоритмах многоцелевой оптимизации, дополнительно уточняет форму магнитных структур для повышения производительности машины. В результате время проектирования магнитных структур уникальной формы для электрических машин может быть значительным.

ТО все чаще применяется в магнитных устройствах [57] и при проектировании электрических машин, особенно на уровне компонентов, таких как магнитопроводы и постоянные магниты [58, 59]. В общем, ТО исследует оптимальное распределение одного или нескольких материалов в пределах определенного проектного пространства. По сравнению с обычными методами оптимизации формы, он предлагает дополнительную гибкость в оптимизации геометрии магнитных компонентов для достижения желаемых характеристик. Таким образом, ТО может давать уникальные формы, которые обычно невозможно реализовать с помощью обычного подхода к оптимизации.

Методы оптимизации топологии

В поисках уникальной и оптимальной геометрии, изготовленной из одного или нескольких материалов, ТО может использовать такие подходы, как метод включения / выключения (*ON/OFF*) и метод, основанный на плотности. Для метода включения / выключения пространство дизайна обычно делится на ячейки или помещается в структуру, подобную сетке. Каждая ячейка затем представлена переменной, такой как нормализованная плотность ρ_n , которой можно присвоить значение ноль или единица. Ноль и единица указывают на отсутствие и наличие материала соответственно. Характер распределения материала может быть определен путем выбора целевых функций и использования эволюционного многоцелевого или градиентного алгоритма. Таким образом, в окончательной конструкции, оптимизированной для топологии с помощью метода включения / выключения, она обычно имеет нестандартную геометрию.

Метод на основе плотности присваивает каждой ячейке непрерывное значение от нуля до единицы. Вариант метода на основе плотности применен к сердечнику ротора синхронной машины с постоянными магнитами в [60]. В данной работе оптимизация топологии на основе магнитных полей направлена на максимальное увеличение среднего крутящего момента при одновременном ограничении пульсаций крутящего момента и приводит к уникальной конструкции сердечника ротора, как показано на рисунке 5. Белые области в сердечнике ротора представляют постоянный магнит, а темно-красные и темно-синие области представляют железо и воздух соответственно. Между ними находятся области с промежуточными значениями плотности, которые представлены разными оттенками цветов.

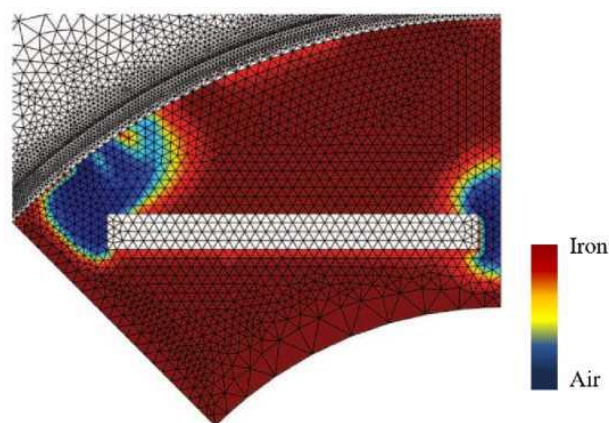


Рис. 5. Иллюстрация оптимизации топологии на основе плотности для сердечника ротора синхронной машины с внутренним постоянным магнитом [60].

Fig. 5. Illustration of density-based topology optimization for the rotor core of a synchronous machine with an internal permanent magnet [60].

Оптимизация топологии на основе магнитных полей может привести к созданию уникальных конструкций, обеспечивающих желаемые электромагнитные характеристики. Эти уникальные конструкции также создают проблемы при изготовлении, которые необходимо учитывать. Использование исключительно алгоритма ТО на основе магнитов приводит к созданию конструкций, оптимизированных только для электромагнитных

характеристик. Поскольку механическая прочность конструкции не входит в число целей оптимизации, механическая целостность конструкции может быть нарушена. Конструкция посчитанная на основе ТО с уникальным распределением воздушных карманов показана на рисунке 6. В данной работе ТО не включает анализ механических напряжений в областях железа, прилегающих к воздушным карманам. Это может привести к разрушению конструкции в реальных условиях эксплуатации, когда соседние участки железа могут подвергаться нагрузкам от 240 МПа до более 450 МПа. Сочетание прочностного и электромагнитного анализа может предложить компромиссные решения для решения этой проблемы. В работах [61, 62] топологическая оптимизация роторов достигается за счет интеграции анализа магнитной и механической структуры.

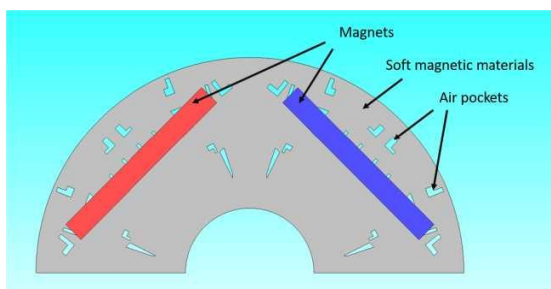


Рис. 6. Пример оптимизации магнитной топологии сердечника ротора синхронной машины с внутренними постоянными магнитами, адаптированный из [62]. Области железа, прилегающие к воздушным карманам и магнитам, могут подвергаться высоким механическим нагрузкам.

Fig. 6. An example of optimizing the magnetic topology of the rotor core of a synchronous machine with internal permanent magnets, adapted from [62]. Areas of iron adjacent to air pockets and magnets can be subjected to high mechanical loads.

Поскольку ТО все чаще применяется при разработке уникальных геометрических форм для электрических машин, технологичность уникальных конструкций магнитных сердечников не менее важна. Сложности конструкции могут увеличить стоимость производства листов электротехнической стали. Аддитивное производство потенциально может преодолеть трудности, наблюдаемые при традиционных методах производства, и в некоторых случаях является единственным жизнеспособным производственным решением [63].

Последние достижения в области АТ, а также распространение его применения в производстве магнитных компонентов для электрических машин возродили ТО как передовой инструмент проектирования. Объединение ТО и АТ потенциально может привести к разработке магнитных компонентов, свойства и геометрия которых сложны. Исследования по интеграции ТО в АТ при производстве магнитных компонентов для электрических машин показали очень многообещающие результаты. В работе [64] оптимизированная по топологии конструкция сердечника ротора машины с постоянными магнитами аддитивно производится с помощью процесса SLM, как показано на рисунке 7. Здесь алгоритм ТО объединяет этапы электромагнитной и структурной оптимизации для достижения геометрии сердечника ротора с уменьшением веса на 50% с учетом максимального напряжения в пределах предела текучести материала. Результат этой работы подчеркивает использование мультифизической ТО в качестве передового инструмента проектирования для АТ при разработке новых нетрадиционных электрических машин.

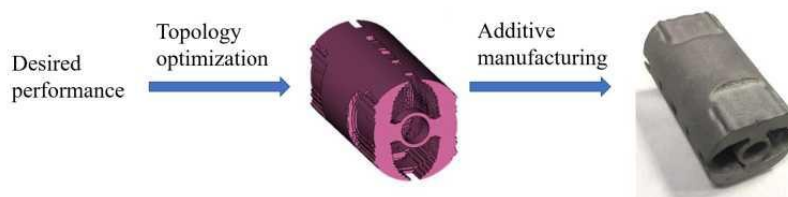


Рис.7. Оптимизированный сердечник ротора на основе ТО. Конструкция аддитивно изготавливается с помощью SLM [64].

Fig. 7. Optimized rotor core based on TO. The design is additively manufactured using SLM [64].

Обсуждение

Внедрение АТ для магнитных компонентов в электрических машинах все еще находится на начальной стадии. Общие темы исследований по применению технологий АТ для электрических машин сосредоточены либо на понимании и улучшении характеристик отдельных компонентов, либо на использовании свободы при проектировании, присущей АТ. Понимание характеристик деталей, изготавливаемых аддитивным способом, может способствовать дальнейшему внедрению АТ для электрических машин, а также их интеграции с оптимизацией топологии в качестве инструмента проектирования.

В настоящее время существует возможность разработки магнитных материалов с полной плотностью печати для электрических машин. Пористость можно наблюдать при микроструктурном анализе напечатанных железо-кремниевых и напечатанных магнитов. Пористость, трещины и остаточные напряжения в процессе печати обычно ухудшают как магнитные, так и механические свойства деталей, напечатанных на 3D-принтере. Эти дефекты снижают относительную проницаемость, магнитное насыщение, характеристики потерь в железе в печатных магнитно-мягких материалах, а также уменьшают остаточную магнитную индукцию и максимальную энергетическую продукцию в напечатанных постоянных магнитах. Печатные железные сердечники и постоянные магниты, если они используются в роторах электрических машин, могут быть подвержены нагрузкам при высокой рабочей скорости. Это потенциально может привести к проблемам с механической целостностью электрических машин. Однако улучшение этих магнитных и механических свойств возможно за счет использования таких методов, как инфильтрация материала или термические методы постобработки.

На текущем этапе большинство АТ используется для отдельных компонентов, с использованием одного материала для печати. Затем печатные компоненты собираются вместе с компонентами, изготовленными традиционным способом, чтобы сформировать электрические машины. Проблемы при печати на нескольких материалах возникают из-за различий в характеристиках материалов. Успешное применение АТ из нескольких материалов может открыть возможности для печати всей электрической машины за один шаг. Ранние исследования АТ из нескольких материалов для электрических машин показали обнадеживающие результаты, фокусируясь одновременно на печати сплавов железа, проводов и изоляции. Время сборки сердечника ротора из одного материала на рисунке 16 составляет около 48 часов. Однако необходимы дальнейшие исследования и разработки для улучшения процесса печати в направлении массового производства [65,66].

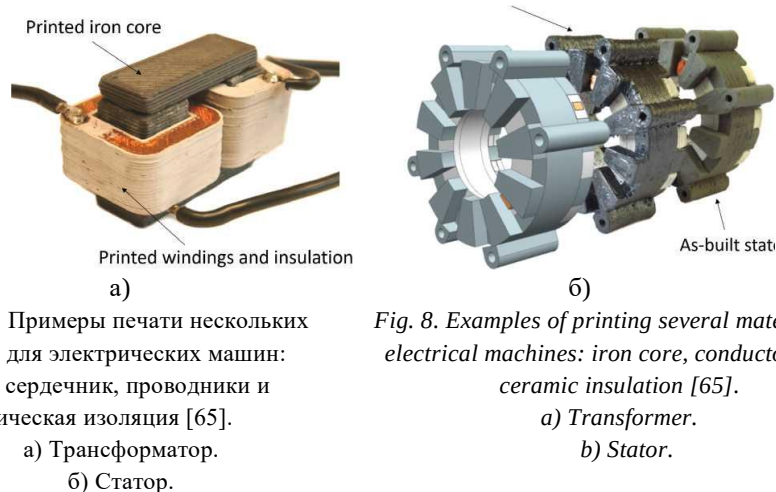


Рис. 8. Примеры печати нескольких материалов для электрических машин: железный сердечник, проводники и керамическая изоляция [65].

а) Трансформатор.
б) Статор.

Fig. 8. Examples of printing several materials for electrical machines: iron core, conductors, and ceramic insulation [65].

a) Transformer.
b) Stator.

Поскольку АТ становится производственным методом реализации для ТО, остаются проблемы с объединением этих двух технологий. Поскольку АТ - это технология изготовления на основе слоев, печатные детали могут страдать от некоторой степени анизотропии. Электромагнитные свойства могут немного отличаться по разным направлениям. Формулировка алгоритма оптимизации топологии должна учитывать эффект анизотропии при применении к задаче трехмерной оптимизации. Еще одна проблема, связанная с ТО, - это объем вычислений. Оптимизация только сердечника ротора с постоянным магнитом с помощью генетического алгоритма может занять до сотен поколений, чтобы привести к фронту Парето. Таким образом, требуются значительные вычислительные мощности для многоцелевой, мультифизической ТО,

состоящей из нескольких материалов.

Выводы

В данной статье представлены текущие исследования и тенденции в области применения аддитивного производства, оптимизации топологии и их интеграции с магнитными компонентами электрических машин. В качестве перспективной технологии аддитивное производство обеспечивает оптимизацию топологии, позволяющую создавать уникальные трехмерные геометрические формы, которые сложно изготовить обычными методами. Успешные комбинации аддитивного производства и оптимизации топологии при изготовлении как железного сердечника, так и постоянного магнита с желаемыми характеристиками показывают большой потенциал в качестве инструмента проектирования для электрических машин.

Таким образом, аддитивные технологии предлагает экономичный метод изготовления полимерных магнитов без ограничений по геометрии и количеству.

Однако, следующие проблемы еще предстоит решить для содействия промышленному применению:

- 1) Необходимо детальное исследование микроструктуры и остаточного напряжения в детали для оптимизации параметров печати.
- 2) Оптимизация диаметров экструзионного сопла, температуры экструзии и размеров частиц исходного магнита.
- 3) Необходимо разработать и внедрить зрелую систему для выравнивания магнитного поля анизотропного порошка во время процесса печати.
- 4) Техничко-экономический анализ аддитивных технологий для того, чтобы конкурировать с традиционными методами изготовления полимерных магнитов.

Литература

1. Brown D.N., Wu Z., He F. et al. Dysprosium-free melt-spun permanent magnets // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. V. 26. pp. 1–8.
2. Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М. Ф. и др. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 58-66.
3. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., Петров Т.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.
4. Green J.A. The defense implications of rare earth shortages // National center for policy analysis [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ncpa.org/pub/ib112> (дата обращения: 17.03.2021).
5. Buchert M., Goldmann D., Schüler-Hainsch, E., Treffer, F. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität Untersuchung im Rahmen des Projektes «Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM» [Resource efficiency and resource-policy aspects of the electromobility system - Study under the auspices of the project Optimisation of environmental potential from electric vehicles - integrated assessment of vehicle use and the energy industry – OPTUM]; Oeko-Institut e.V.; TU Clausthal, IFAD, Daimler AG, Umicore AG & Co. KG, 2012.
6. Грачева Е.И., Абдуллазянов Р.Э., Алимова А.Н. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 53-65.
7. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В. и др. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 7-8. С. 107-116.
8. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 77-85.
9. Гибадуллин Р.Р., Цветков А.Н., Ившин И.В., и др. Бездатчиковый метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 133-143.

10. Elwert T. et al. Recycling of ndfeb magnets from electric drive motors of (hybrid) electric vehicles // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. Т. 3. №. 1. С. 108-121. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0085-1>
11. Yang Y. et al. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. Т. 3. №. 1. С. 122-149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>
12. Kumari A. et al. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects // *Waste Management*. 2018. Т. 75. С. 486-498.
13. Yu Y. et al. The price evolution of wind turbines in China: A study based on the modified multi-factor learning curve // *Renewable Energy*. – 2017. – Т. 103. – С. 522-536.
14. Ganesan A.U. et al. Performance Analysis of Single-Phase Electrical Machine for Military Applications // *Energies*. 2019. Т. 12. №. 12. С. 2285.
15. Huber C. et al. 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer // *Applied Physics Letters*. 2016. Т. 109. №. 16. С. 162401.
16. Khazdozian H.A. et al. Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets // *AIP Advances*. 2018. Т. 8. №. 5. С. 056722.
17. Yang F. et al. 3D printing of NdFeB bonded magnets with SrFe₁₂O₁₉ addition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Т. 779. С. 900-907.
18. Li L. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // *Scientific reports*. 2016. Т. 6. №. 1. С. 1-7.
19. Li L. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges // *Scripta Materialia*. 2017. Т. 135. С. 100-104.
20. Paranthaman M. P. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process // *Jom*. 2016. Т. 68. №. 7. С. 1978-1982.
21. Yamazaki K., Mukaiyama H., Daniel L. Effects of multi-axial mechanical stress on loss characteristics of electrical steel sheets and interior permanent magnet machines // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017. Т. 54. №. 3. С. 1-4.
22. Yamazaki K. et al. Characteristics improvement of claw-pole alternators by reducing armature reaction // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2017. С. 1-6.
23. Kustas A.B. et al. Characterization of the Fe-Co-1.5 V soft ferromagnetic alloy processed by Laser Engineered Net Shaping (LENS) // *Additive Manufacturing*. 2018. Т. 21. С. 41-52.
24. Копылов А.М., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р. и др. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 9-10. С. 126-132.
25. Geng J. et al. Bulk combinatorial synthesis and high throughput characterization for rapid assessment of magnetic materials: Application of laser engineered net shaping (lens™) // *Jom*. 2016. V. 68. №. 7. pp. 1972-1977.
26. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., и др. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. Т. 11. № 1(41). С. 3-9.
27. Mikler C.V. et al. Laser additive processing of Ni-Fe-V and Ni-Fe-Mo permalloys: microstructure and magnetic properties // *Materials Letters*. 2017. V. 192. pp. 9-11.
28. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92.
29. Garibaldi M. et al. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // *Journal of Mechanical Design*. 2019. V.141. №. 7.
30. McGarry C., McDonald A., Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019. pp. 656-663.
31. Silbernagel C. Investigation of the design, manufacture and testing of additively manufactured coils for electric motor applications : дис. University of Nottingham, 2019.
32. Wu F., EL-Refaie A.M. Toward additively manufactured electrical machines: opportunities and challenges // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. V. 56. №. 2. pp 1306-1320.
33. Wrobel R., Mecrow B.A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. V. 35.

№. 2. pp. 1054-1064.

34. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., и др. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 10-18.

35. Krings A. et al. Soft magnetic material status and trends in electric machines //IEEE transactions on industrial electronics. 2016. V. 64. №. 3. pp. 2405-2414.

36. Libert F., Soulard J. Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings // 2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives-PEMD 2006. IET, 2006. pp. 676-680.

37. Jack A.G. et al. Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings // IEEE Transactions on industry applications. 2000. V. 36. №. 4. pp. 1077-1084.

38. Zhang Z.Y. et al. Metal 3D printing of synchronous reluctance motor //2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2016. Pp. 1125-1128.

39. Zhang Z.Y. et al. Characteristic comparison of transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor fabrication based on 2D lamination and 3D printing //2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2015. pp. 894-897.

40. Tseng G.M. et al. Application of additive manufacturing for low torque ripple of 6/4 switched reluctance motor // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2016. Pp. 1-4.

41. Garibaldi M. et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9% wt Si soft magnets //Materials Characterization. 2018. V. 143. Pp.144-151.

42. Jhong K.J., Huang W.C., Lee W.H. Microstructure and magnetic properties of magnetic material fabricated by selective laser melting // Physics Procedia. 2016. V. 83. pp. 818-824.

43. Lammers S. et al. Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine // 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2016. Pp. 41-45.

44. Garibaldi M. et al. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing // Scripta Materialia. 2018. V. 142. Pp. 121-125.

45. Сафин А.Р., Петров Т.И., Копылов А.М. и др. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 2(46). С. 45-53.

46. Garibaldi M. et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting // Acta Materialia. 2016. V. 110. pp. 207-216.

47. Li L. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // Scientific reports. 2016. V. 6. №. 1. pp. 1-7.

48. Urban N., Huber F., Franke J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting // 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2017. Pp. 1-5.

49. Compton B. G. et al. Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets //Materials and Manufacturing Processes. 2018. V. 33. №. 1. pp. 109-113.

50. Paranthaman M. P. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process // Jom.2016. V. 68. №. 7. Pp. 1978-1982.

51. Li L. et al. A novel method combining additive manufacturing and alloy infiltration for NdFeB bonded magnet fabrication // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. – V. 438. pp. 163-167.

52. Li L. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges // Scripta Materialia. 2017. V. 135. Pp. 100-104.

53. Li L. et al. Fabrication of highly dense isotropic Nd-Fe-B nylon bonded magnets via extrusion-based additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. V. 21. pp. 495-500.

54. White E.M. H. et al. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. V 53. №. 11. pp. 1-6.

55. Pham T.Q., Foster S.N. Additive Manufacturing of Non-homogeneous Magnetic Cores for Electrical Machines Opportunities and Challenges // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2020. V 1. Pp. 1623-1629.

56. McGarry C., McDonald A., Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019. pp. 656-663.
57. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 65-74.
58. Safin A., Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. V. 220.
59. Petrov T., Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01016.
60. Hermann A.N.A., Mijatovic N., Henriksen M. L. Topology optimisation of PMSM rotor for pump application // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2016. pp. 2119-2125.
61. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01049.
62. Guo F. et al. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. V. 56. №. 4. pp. 3656-3667.
63. Liu L. et al. Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. №. 4. pp. 3541-3547.
64. Garibaldi M. et al. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // Journal of Mechanical Design. 2019. V. 141. №. 7.
65. Studnitzky T. et al. 3D Screen Printing-Mass Production for Metals, Ceramics and its Combinations // Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC. 2016. C. 9-13.
66. Dadabaev S.T., Gracheva E.I., Dadabaeva Z.A. Study of Starting Transition Processes of Asynchronous Motor at a Lowered Mains Voltage Frequency // International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Springer, Cham, 2020. pp 206-213.

Авторы публикации

Сафин Альфред Робертович – д-р. техн. наук, профессор кафедры Электроснабжение промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет. Email:sarkazan@bk.ru.

Ranjan Kumar Behera – Ph.D., доцент кафедры Электротехники, Индийский технологический институт, Индия, Kanra Road, Bihta, г. Патна.

References

1. Brown DN, Wu Z, He F. et al. Dysprosium-free melt-spun permanent magnets. *Journal Physics.: Condens. Matter.* 2014;26:1–8.
2. Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF, et al. Stand for post-repair tests of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2019;21(3-4):58-66. doi 10.30724 / 1998-9903-2019-21-3-4-58-66.
3. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply with a free piston engine based on a synchronous electric machine of reciprocating action with permanent magnets. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2020; 22 (1):38-48. doi 10.30724 / 1998-9903-2020-22-1-38-48.
4. Green JA. The defense implications of rare earth shortages. *National center for policy analysis [Electronic resource]*. URL: <http://www.ncpa.org/pub/ib112> (date of the application: 17.03.2021).
5. Buchert M, Goldmann D, Schüler-Hainsch E, et al. Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität Untersuchung im Rahmen des Projektes «Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM». Oeko-Institut e.V. TU Clausthal. IFAD. Daimler AG. Umicore AG & Co. KG. 2012.
6. Gracheva EI, Abdullazyanov RE, Alimova A.N. Analysis and methods of calculating active power and electricity losses in low-voltage shop networks. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2018; 4 (40):53-65.

7. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV. et al. Model of the control system of the pumping chair based on synchronous motors with sensorless method. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2018; 20(7-8):107-116.
8. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM. et al. Development of a method for topological optimization of electrical machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2018; 4(40):77-85.
9. Gibadullin RR, Tsvetkov AN, Ivshin IV., et al. A sensorless method for monitoring the position of a moving element of an electric machine of reciprocating action. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2017; 19(7-8): 133-143.
10. Elwert T, Goldman D, Roemer F. et al. Recycling of ndfeb magnets from electric drive motors of (hybrid) electric vehicles. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017; 3(1) : 108-121. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0085-1>
11. Yang Y, Walton A, Sheridan R. et al. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017; 3(1):122-149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>.
12. Kumari A, Sinha MK, Pramanik S. et al. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*. 2018; 75: 486-498.
13. Yu Y, Li H, Che Y. et al. The price evolution of wind turbines in China: A study based on the modified multi-factor learning curve. *Renewable Energy*. 2017; 103: 522-536.
14. Ganesan AU, Nandhagopal S, Venkat AS. Performance Analysis of Single-Phase Electrical Machine for Military Applications. *Energies*. 2019; 12(12): 2285.
15. Huber C, Abert C, Buckner F. et al. 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer. *Applied Physics Letters*. 2016; 109(16):162401.
16. Khazdozian HA, Manzano JS, Gandha K. et al. Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets. *AIP Advances*. 2018; 8 (5): 056722.
17. Yang F, Zhang X, Guo Z. et al. 3D printing of NdFeB bonded magnets with SrFe₁₂O₁₉ addition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019; 779: 900-907.
18. Li L, Tirado A, Nlebedim IC. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Scientific reports*. 2016; 6(1): 1-7.
19. Li L, Post B, Kunc V. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges. *Scripta Materialia*. 2017; 135: 100-104.
20. Paranthaman MP, Shafer CS, Elliott AM. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process. *Jom*. 2016; 68(7):1978-1982.
21. Yamazaki K, Mukaiyama H, Daniel L. Effects of multi-axial mechanical stress on loss characteristics of electrical steel sheets and interior permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017; 54(3): 1-4.
22. Yamazaki K, Suzuki R, Nuka M. et al. Characteristics improvement of claw-pole alternators by reducing armature reaction. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. IEEE. 2017; 1-6.
23. Kustas AB, Susan DF, Jonson KL. et al. Characterization of the Fe-Co-1.5 V soft ferromagnetic alloy processed by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *Additive Manufacturing*. 2018; 21: 41-52.
24. Kopylov AM, Safin AR, Gibadullin RR. et al. Development of an electric machine of reciprocating action of a modular type. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2016; 9-10: 126-132.
25. Geng J, Nlebedim IC., Besser MF. et al. Bulk combinatorial synthesis and high throughput characterization for rapid assessment of magnetic materials: Application of laser engineered net shaping (lensTM). *Jom*. 2016; 68(7): 1972-1977.
26. Gracheva EI., Sadykov RR, Khusnutdinov RR. et al. Reliability and layout of low-voltage switchgears of intra-shop power supply. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2019; 11(1):3-9.
27. Mikler CV, Chaudhary V, Borkar T. et al. Laser additive processing of Ni-Fe-V and Ni-Fe-Mo permalloys: microstructure and magnetic properties. *Materials Letters*. 2017; 192: 9-11.
28. Gracheva EI, Alimova AN. Possible errors in the calculation of electricity losses in shop industrial networks. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2018; 20(11-12): 81-92. doi 10.30724 / 1998-9903-2018-20-11-12-81-92.
29. Garibaldi M, Gerada C. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2019; 141(7).
30. McGarry C, McDonald A, Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured

permanent magnets for wind turbine generators. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. IEEE. 2019:656-663.

31. Silbernagel C. Investigation of the design, manufacture and testing of additively manufactured coils for electric motor applications: Dis. – University of Nottingham, 2019.

32. Wu F, EL-Refaie A. M. Toward additively manufactured electrical machines: opportunities and challenges . *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019; 56(2):1306-1320.

33. Wrobel R, Mecrow B. A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020; 35(2): 1054-1064.

34. Gracheva EI, Sadykov RR, Khusnutdinov RR, et al. Investigation of the reliability parameters of low-voltage switching devices according to the operational data of industrial enterprises. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2019; 21(1-2):10-18. doi 10.30724 / 1998-9903-2019-21-1-2-10-18.

35. Krings A, Boglietti A, Cavagnino A. Soft magnetic material status and trends in electric machines. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2016; 64(3): 2405-2414.

36. Libert F, Soulard J. Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings. *2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives-PEMD 2006*. IET. 2006: 676-680.

37. Jack AG, Mecrow BC, Dickinson PG. et al. Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings. *IEEE Transactions on industry applications*. 2000; 36(4):1077-1084.

38. Zhang ZY, Jhong KJ, Cheng CW. et al. Metal 3D printing of synchronous reluctance motor. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE. 2016: 1125-1128.

39. Zhang ZY, Tsai MC, Huang PW. et al. Characteristic comparison of transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor fabrication based on 2D lamination and 3D printing. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE. 2015: 894-897.

40. Tseng GM, Jhong KJ, Tsai MS. et al. Application of additive manufacturing for low torque ripple of 6/4 switched reluctance motor. *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE. 2016: 1-4.

41. Garibaldi M, Ashcroft I, Hillier N. et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9% wt Si soft magnets .*Materials Characterization*. 2018;143: 144-151.

42. Jhong KJ, Huang WC, Lee W. H. Microstructure and magnetic properties of magnetic material fabricated by selective laser melting. *Physics Procedia*. 2016; 83: 818-824.

43. Lammers S, Adam G, Schmid HJ. et al. Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE. 2016: 41-45.

44. Garibaldi M, Ashcroft I, Lemke JN. et al. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing. *Scripta Materialia*. 2018; 142: 121-125

45. Safin AR, Petrov TI, Kopylov AM, et al. The method of design and topological optimization of rotors of permanent magnet synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2020; 12(2): 45-53.

46. Garibaldi M, Ashcroft I, Simonelli M, et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting. *Acta Materialia*. 2016;110: 207-216.

47. Li L, Nlebedim IC, Rios O, et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Scientific reports*. 2016; 6(1): C. 1-7.

48. Urban N, Huber F, Franke J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE. 2017:1-5.

49. Compton BG, Kemp JW, Novikov TV, et al. Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018; 33(1) :109-113.

50. Paranthaman MP, Shafer CS, Elliott AM. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process. *Jom*.2016; 68(7): 1978-1982.

51. Li L, Tirado A, Conner BS. et al. A novel method combining additive manufacturing and alloy infiltration for NdFeB bonded magnet fabrication. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017; 438: 163-167.

52. Li L, Post B, Kunc V. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded

magnets: Prospects and challenges. *Scripta Materialia*. 2017; 135: 100-104.

53. Li L, Jones K, Sales B. et al. Fabrication of highly dense isotropic Nd-Fe-B nylon bonded magnets via extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2018; 21: 495-500.

54. White EM. H., Kassen AG, Simsek E. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017; 53(11): 1-6.

55. Pham TQ, Foster SN. Additive Manufacturing of Non-homogeneous Magnetic Cores for Electrical Machines Opportunities and Challenges. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE*. 2020; 1: 1623-1629.

56. McGarry C, McDonald A, Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE*. 2019: 656-663.

57. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and assessment of energy savings in intra-plant power supply systems. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2020; 22(2): 65-74. doi 10.30724 / 1998-9903-2020-22-2-65-74.

58. Safin A, Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020: 220.

59. Petrov T, Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2020; 178: 01016.

60. Hermann ANA, Mijatovic N, Henriksen ML. Topology optimisation of PMSM rotor for pump application. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE*. 2016: 2119-2125.

61. Petrov T, Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020; 178: 01049.

62. Guo F, Salameh M, Krishnamurthy M, et al. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020;56(4):3656-3667.

63. Liu L, Ding C, Lu S, et al. Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(4);3541-3547.

64. Garibaldi M, Gerada C. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2019; 141(7).

65. Studnitzky T, Dressler M, Andersen O, et al. 3D Screen Printing-Mass Production for Metals, Ceramics and its Combinations. *Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC*. 2016: 9-13.

66. Dadabaev ST, Gracheva EI, Dadabaeva ZA. Study of Starting Transition Processes of Asynchronous Motor at a Lowered Mains Voltage Frequency. *International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Springer, Cham*. 2020: 206-213.

Authors of the publication

Alfred R. Safin – Kazan State Power Engineering University. Kazan. Email: sarkazan@bk.ru.

Ranjan Kumar Behera – Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT), India, Kanpa Road, Bihta. 801103, Patna.

Получено

01.04.2021 г.

Отредактировано

06.04.2021 г.

Принято

27.04.2021 г.



ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЗАДАЧИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

А.В. Виноградов, А.В. Виноградова, А.Ю. Сейфуллин, А.В. Букреев,
В.Е. Большев

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва,
Российская Федерация
winaleksandr@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть и проанализировать определения понятий «конфигурация электрической сети», «управление конфигурацией электрической сети», «параметры конфигурации электрической сети». Обосновать необходимость управления конфигурацией электрических сетей, описать принципы и способы управления конфигурацией электрической сети. Продемонстрировать реализацию принципов управления конфигурацией электрической сети на примере электрической сети номинальным напряжением 0,4 кВ с применением авторских технических средств управления конфигурацией. *МЕТОДЫ.* На основе литературного обзора в ходе исследования были определены формулировки ключевых понятий, таких как «конфигурация электрической сети», «управление конфигурацией электрической сети», «параметры конфигурации электрической сети». Показаны способы управления конфигурацией электрической сети. Рассмотрены предлагаемые авторами принципы управления конфигурацией электрической сети, к которым отнесены наблюдаемость, управляемость, сегментируемость, гибкость конфигурации электрической сети, интеллектуализация оборудования и интегрированность в экономику. Раскрыта сущность каждого из принципов управления и показаны эффекты от их внедрения. Эффекты внедрения принципов управления конфигурацией заключаются в уменьшении количества случаев перерывов электроснабжения и сокращении времени перерывов электроснабжения потребителей, несоответствия параметров качества поставляемой им электроэнергии, а также в повышении доступности электроэнергетической инфраструктуры. Приведено обоснование необходимости управления конфигурацией электрических сетей. В рамках проведенного исследования применялся метод системного анализа, методы сравнений и аналогий, экспертных оценок. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На примере схемы электроснабжения потребителей на напряжении 0,4 кВ проиллюстрирована реализация принципов управления конфигурацией электрических сетей с применением авторских технических средств – мультиконтактных коммутационных систем, вводно-учётно-распределительных устройств, интегрируемых в системы мониторинга параметров режимов работы электрических сетей и других устройств. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Реализация принципов управления конфигурацией электрических сетей позволяет повысить эффективность систем электроснабжения потребителей и при этом обуславливает необходимость разработки новых технических средств автоматизации и мониторинга параметров режимов работы электрических сетей.

Ключевые слова: электрические сети низкого напряжения; конфигурация электрической сети; управление конфигурацией электрической сети; принципы управления конфигурацией электрической сети; эффективность систем электроснабжения.

Для цитирования: Виноградов А.В., Виноградова А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В., В.Е. Большев Принципы управления конфигурацией электрической сети и задачи по их реализации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 34-46. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-34-46.

PRINCIPLES OF ELECTRICAL GRID CONFIGURATION MANAGEMENT AND TASKS OF THEIR IMPLEMENTATION

AV. Vinogradov, AV. Vinogradova, AY. Seyfullin, AV. Bukreev, VE. Bolshev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

winaleksandr@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider and analyze the definitions of the concepts "configuration of the electrical grid", "control of the configuration of the electrical grid", "parameters of the configuration of the electrical grid". To justify the need to manage the configuration of electrical grid, describe the principles and methods of managing the configuration of the electrical grid. To demonstrate the implementation of the principles of managing the configuration of the electrical grid on the example of an electrical grid with a nominal voltage of 0.4 kV with the use of proprietary technical configuration management tools. *METHODS.* Based on the literature review, the study identified the wording of key concepts, such as "configuration of the electrical grid", "management of the electrical grid configuration", "parameters of the electrical grid configuration". Methods of managing the configuration of the electrical grid are shown. The principles of electrical grid configuration management proposed by the authors are considered, which include observability, manageability, segmentability, flexibility of the electrical grid configuration, equipment intellectualization, and integration into the economy. The essence of each of the management principles is revealed and the effects of their implementation are shown. The effects of implementing the configuration management principles are to reduce the number of power supply interruptions and reduce the time of power supply interruptions to consumers, mismatch the quality parameters of the electricity supplied to them, as well as to increase the availability of electricity infrastructure. The rationale for the need to manage the configuration of electrical grid is given. Within the framework of the conducted research, the method of system analysis, methods of comparisons and analogies, and expert assessments were used. *RESULTS.* On the example of the scheme of power supply to consumers at a voltage of 0.4 kV, the implementation of the principles of control of the configuration of electrical grid with the use of proprietary technical means – multi-contact switching systems, input-accounting-distribution devices integrated into the monitoring systems of the parameters of the operating modes of electrical grid and other devices is illustrated. *CONCLUSION.* The implementation of the principles of configuration management of electrical grid allows to increase the efficiency of power supply systems for consumers and at the same time causes the need to develop new technical means of automation and monitoring of parameters of operating modes of electrical grids.

Keywords: low-voltage electrical grids; electrical grid configuration; electrical grid configuration management; principles of electrical grid configuration management; efficiency of power supply systems.

For citation: Vinogradov AV, Vinogradova AV, Seyfullin AY, Bukreev AV, Bolshev VE. Principles of electrical grid configuration management and tasks of their implementation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):34-46. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-34-46.

Введение и литературный обзор

Конфигурация электрических сетей является одним из главных факторов, влияющих на показатели надёжности электроснабжения, качества электроэнергии, доступности электросетевой инфраструктуры. Представители научно-исследовательского сообщества и эксплуатирующих организаций активно используют данный термин, однако до настоящего времени отсутствует общепринятая трактовка. Данное обстоятельство приводит к отсутствию единого определения понятия конфигураций электрических сетей. В различных источниках^{1,2} электрические сети с одинаковой структурой, топологией классифицируются по-разному с точки зрения их конфигурации. [1]. На основе вышесказанного, в результате анализа понятий, входящих в термин «Конфигурация электрической сети», предлагается следующая формулировка: «Конфигурация электрической сети – это характеристика

¹ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

² Ершов А.М. Системы электроснабжения. Часть 3: Системы электроснабжения напряжением 6–220 кВ: курс лекций / А.М. Ершов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. 267 с.

электрической сети по взаимному расположению на схеме и в пространстве входящих в её состав электроустановок, электрооборудования, а также по соотношению между собой их технических характеристик» [2]. Соответственно «Управление конфигурацией электрических сетей – это процесс целенаправленного воздействия оперативного персонала, обслуживающего электрическую сеть, средств релейной защиты и автоматики, средств дистанционного управления на оборудование электрической сети для достижения требуемых параметров конфигурации электрической сети». При этом «Параметры конфигурации – схема электрической сети, пространственное расположение элементов электрической сети, технические характеристики электрооборудования электрической сети, параметры режимов работы электрической сети» [2].

Актуальность управления конфигурацией электрических сетей, в первую очередь посредством их секционирования и резервирования, подтверждается большим количеством публикаций на эту тему в зарубежных источниках. В работе индийских авторов [3] предлагается подход к оптимизации размещения реклоузеров в сети, учитывающий неопределённость нагрузок, потока отказов, количества ремонтов оборудования сети. В работах [4, 5] рассматривается применение средств секционирования и резервирования для управления нагрузками линий электропередачи. При этом для поиска рационального количества устанавливаемых в сети реклоузеров применяется эвристический подход, методы оптимизации роя частиц. В данном случае подход к определению количества реклоузеров основан на оценке надёжности электроснабжения потребителей.

В статье [6] рассматриваются вопросы планирования автоматизации радиальных распределительных сетей с распределённой генерацией с учетом вариативности выработки электроэнергии и её потребления. Предлагаемый метод определения мест установки устройств автоматизации сети основан на применении нелинейной логики, анализе управления рисками.

Вопросы управления конфигурацией электрической сети с помощью устройств секционирования и резервирования рассмотрены также в статьях [7, 8, 9, 10, 11, 12] где используются различные методы оптимизации определения мест установки и количества пунктов секционирования и резервирования в электрических сетях. Однако указанные работы рассматривают в основном сети среднего класса напряжения и не затрагивают вопросы управления конфигурацией электрических сетей низкого напряжения.

Особенно актуальна задача управления конфигурацией микросетей. В своей работе [13] авторы поднимают проблему управления потоками электроэнергии в микросетях и выполняют анализ работ, связанных с этой тематикой. В первую очередь производится оценка методов прогнозирования балансов выработки и потребления электроэнергии в микросетях с распределённой генерацией. Глубоко проанализированы методы моделирования, методы планирования выработки и потребления электроэнергии с учётом показателей надёжности, неопределённости нагрузок и генерации, устойчивости микросетей. Рассмотрены подробно и другие актуальные вопросы. В статье [14] рассмотрены вопросы регулирования частоты в микросетях с распределённой генерацией при изменении балансов активной мощности в сети. В статье [15] также решается задача оптимизации управления потоками энергии в микросетях. При этом для всесторонней оценки производительности микросети предлагается учитывать цены на электроэнергию, выбросы от источников энергии в окружающую среду и качество обслуживания, под которым подразумевается соотношение спроса и предложения на электроэнергию. Обоснованы весовые коэффициенты каждого из указанных показателей для выбора оптимальной структуры микросети и управления ею. Предлагаемый подход может применяться к микросетям, работающим как автономно, так и параллельно относительно централизованной системы электроснабжения. Для этого сеть оснащается средствами секционирования и резервирования, то есть средствами управления её конфигурацией.

Методы

В рамках данного исследования применялся метод системного анализа, методы сравнений и аналогий, экспертных оценок. Исходя из обзора литературы и предлагаемого определения конфигурации электрической сети можно сделать вывод, что конфигурацией следует управлять, воздействуя на каждый из её параметров отдельно, или комплексно на несколько параметров. В таблице 1 приведены основные способы управления конфигурацией электрической сети.

Таблица 1

Основные способы управления конфигурацией электрической сети

№п/п	Изменяемый параметр конфигурации	Способ воздействия
1	Схема электрической сети	1. Ручное, или автоматическое изменение состояния (переключения) коммутационных аппаратов. 2. Реконструкция / модернизация электрической сети с изменением её схемы.
2	Пространственное положение элементов электрической сети	1. Реконструкция / модернизация электрической сети с изменением пространственного положения элементов сети. 2. Ручное, или автоматическое изменение состояния (переключения) коммутационных аппаратов (изменение пространственного положения в этом случае относительное, например, изменяется положение источника питания относительно какой-либо точки сети при включении резервного источника, что влияет на параметры режимов работы сети)
3	Технические характеристики электрооборудования электрической сети	1. Замена электрооборудования, элементов электрической сети, в том числе проводов, опор, трансформаторов, средств релейной защиты и автоматики и т.д. 2. Осуществление ручного, или автоматического регулирования технических характеристик оборудования, например, изменение положения переключателя ПБВ, РПН на силовом трансформаторе, изменение уставки срабатывания реле, автоматического выключателя и т.п.
4	Параметры режимов работы электрической сети	1. Ручное, или автоматическое изменение состояния (переключения) коммутационных аппаратов. 2. Осуществление ручного, или автоматического регулирования технических характеристик оборудования. 3. Изменение значения и характера нагрузки, подключенной к сети, например, подключение установок компенсации реактивной мощности, дополнительных нагрузок (в основном это осуществляется переключением коммутационных аппаратов, но следует рассматривать этот способ управления отдельно в связи с особенностями воздействия на параметры режимов работы сети). 4. Изменение параметров выдаваемой электроэнергии источниками, подключенными к сети, например, изменение значения напряжения, мощности, частоты и т.п.

Основной целью управления конфигурацией электрической сети является сокращение количества и продолжительности перерывов в электроснабжении потребителей, количества случаев и продолжительности несоответствия качества поставляемой электроэнергии требованиям норм и договорных условий, а также обеспечение доступности электросетевой инфраструктуры, то есть обеспечение возможности присоединения новых потребителей к электрическим сетям и сокращение сроков осуществления присоединений. В работах [16, 17, 18] подробно рассмотрена структура времени перерывов в электроснабжении, времени несоответствия качества электроэнергии и времени осуществления технологических присоединений и их составляющих.

Так, время перерывов в электроснабжении $t_{\text{пер}}$, ч, представлено следующим образом:

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{восст}} + t_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{восст}}$ – время восстановления электроснабжения после отказа, ч; $t_{\text{пл}}$ – время плановых отключений для проведения обслуживания и ремонта, ч.

Время восстановления электроснабжения $t_{\text{восст}}$, ч, в свою очередь, представлено:

$$t_{\text{восст}} = t_{\text{пол.инф}} + t_{\text{расп.инф}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{согл.вкл}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{пол.инф}}$ – время получения информации, ч (временной интервал с момента возникновения отказа до момента времени получения информации о нем диспетчерской службой электросетевой организации, эксплуатирующей электрическую сеть, в которой произошло повреждение);

$t_{\text{расп.инф}}$ – время на распознавание информации, ч (временной интервал на определение места повреждения, подготовку необходимых материалов и инструментов для ремонта, движение бригад к месту повреждения и т.п., отсчитываемый с момента получения информации о повреждении до момента начала ремонта);

$t_{\text{рем}}$ – время на ремонт, ч (временной интервал на производство ремонтных работ, отсчитываемый с момента начала ремонта, включая подготовку рабочего места, до момента его окончания);

$t_{\text{согл.вкл}}$ – время на согласование включения и включение, ч (временной интервал на согласование включения отключенного ранее оборудования и непосредственно включение данного оборудования, отсчитываемый с момента окончания ремонта до момента полного восстановления электроснабжения) [16, 17, 18].

Минимизировать эти временные интервалы возможно за счёт управления конфигурацией электрических сетей на разных уровнях, в том числе на уровне организации интеллектуальных электрических сетей, что предполагает реализацию принципов наблюдаемости, управляемости, гибкости конфигурации, сегментируемости, интеллектуализации оборудования и интегрированности в экономику. Данные принципы представлены в работах [2, 18].

При этом управление конфигурацией предполагает наличие цели для управляющего воздействия и наличие обратной связи для контроля результатов воздействия. Цель воздействия появляется при таком изменении режима работы электрической сети, при котором следует изменить конфигурацию сети. Это изменение режима характеризуется соответствующими его параметрами, которые необходимо своевременно выявить. Следовательно, необходимо оснащение электрических сетей, в том числе сельских, системами, техническими средствами контроля, мониторинга параметров режимов работы, а также технического состояния оборудования сети, положения коммутационных аппаратов, установленных в ней. Это обеспечит выполнение принципа наблюдаемости сети.

Информация, получаемая от средств и систем мониторинга параметров режимов работы электрической сети должна быть структурирована для рационального использования её средствами и системами управления конфигурацией электрической сети. Наличие систем мониторинга позволяет своевременно реагировать на изменение режима работы электрической сети, в том числе на возникновение аварийных отключений в ней, недопустимое отклонение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и т.п. Так, проведённое исследование [16] показало, что при отсутствии систем мониторинга время восстановления электроснабжения в среднем составляет более четырёх-пяти часов, причём время на получение информации об отключении составляет 1,01 ч. При осуществлении мониторинга это время возможно сократить в десятки раз, минимальное его значение будет ограничиваться скоростью передачи информации от датчика системы мониторинга до диспетчера электрической сети и скоростью его реакции на получение данной информации. Выполненное в диссертации [18] исследование показало, что в рассмотренном примере время получения информации при наличии системы мониторинга сократилось с 1,01 ч до 0,0044 ч, то есть в 230 раз.

Однако в структуру времени перерывов в электроснабжении входят также другие составляющие – время на распознавание информации, время на осуществление ремонта, время на согласование и включение [16, 18]. Наличие в сети средств мониторинга позволяет сократить время распознавания информации, так как локализует место поиска повреждений в электрической сети. В рассмотренном в исследовании [18] примере время распознавания информации о повреждении сократилось с 2,94 ч до 0,55 ч, то есть в 5,33 раз. Остальные составляющие времени за счёт средств мониторинга сократить не удаётся. Также невозможно сократить за счёт осуществления мониторинга и время плановых перерывов в электроснабжении, хотя и возможно сократить значения ущербов от данных перерывов, так как появляется возможность составления графика плановых отключений с учётом времени минимальных нагрузок в сети.

Аналогично, наличие систем мониторинга позволяет сокращать и время несоответствия качества поставляемой потребителям электроэнергии за счёт своевременного выявления отклонений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и выполнения мероприятий по их регулированию. Положительно влияет наличие средств мониторинга в сети и на доступность электросетевой инфраструктуры, позволяя контролировать загрузку сети и, при угрозе возникновения дефицита пропускной способности, осуществлять мероприятия по развитию, реконструкции сети, как это показано, например, в статье [2].

Дальнейшее сокращение времени восстановления электроснабжения, времени несоответствия качества поставляемой электроэнергии, требует реализации следующего принципа - управляемости сети. Для этого устанавливаемые в сети коммутационные аппараты, другое оборудование оснащается средствами его автоматического, дистанционного управления. Это, в случае применения средств секционирования и резервирования сети, даёт возможность реализовывать принцип гибкости конфигурации сети, то есть возможность её изменения при изменении режимов работы сети. Например, реализация этого принципа позволяет изолировать повреждённые участки сети и подать питание от резервного источника на неповреждённые (при наличии резервных источников). При этом время восстановления неповреждённых участков сокращается до времени осуществления автоматического включения резерва (АВР). Сокращение времени восстановления на примере сети, приведённой в работе [18] для повреждённых участков составило 2,8 раз, а для неповреждённых за счёт АВР – 32,5 раз. Такой эффект может быть получен за счёт установки в электрических сетях устройств секционирования и резервирования, в том числе мультиконтактных коммутационных систем (МКС), представляющих собой коммутационные аппараты с двумя и более независимыми контактными группами [18], секционирующих пунктов (СП), универсальных секционирующих пунктов (СПАВР), [19, 20].

Сокращение времени несоответствия качества электроэнергии достигается за счёт управления оборудованием, которое может управлять ПКЭ, например, устройствами РПН трансформаторов. При этом система мониторинга параметров режимов работы в сети позволяет получать необходимые данные, на основе которых возможно осуществлять способы автоматического адаптивного регулирования напряжением, как это предлагается в статье [21]. В качестве средств управления ПКЭ также могут использоваться сетевые фильтры, устройства компенсации реактивной мощности и т.п.

Следующий принцип управления конфигурацией электрической сети, реализация которого позволяет сокращать время перерывов в электроснабжении и время несоответствия качества электроэнергии – сегментируемость сети. Суть этого принципа заключается в том, что сеть должна быть способна работать как совместно с централизованной системой электроснабжения, так и разделяться на участки, работающие автономно при отсутствии связи с другими участками сети и централизованной системой электроснабжения. При этом каждый участок сети должен иметь свой источник электроснабжения, в качестве которого могут выступать источники электроэнергии, в том числе возобновляемые (ВИЭ). Эти источники, при работе параллельно с сетью должны синхронизироваться с ней. Поскольку сеть сегментируется с помощью установленных в ней коммутационных аппаратов, таких как МКС, то синхронизация, в том числе, должна выполняться в точке установки данных аппаратов. Выполнение принципа сегментируемости сети, таким образом, требует разработки новых способов и технических средств управления конфигурацией электрических сетей с учётом такой «удалённой» синхронизации.

Реализация принципа управляемости сети, как было показано выше, позволяет осуществлять дистанционное и автоматическое управление её конфигурацией. Однако, при построении электрических сетей с применением технологий Smart Grid, должен реализовываться следующий принцип управления конфигурацией электрической сети – интеллектуализация оборудования. Это значит, что оборудование, устанавливаемое в сети, такое как СП, СПАВР, МКС, оборудование трансформаторных подстанций (ТП) должно оснащаться интеллектуальными системами мониторинга, контроля, учёта и управления, позволяющими интегрировать данное оборудование в структуру интеллектуальной сети. Предполагается при этом, что оборудование самостоятельно реагирует на изменение ситуации в сети и принимает решение о переключениях с целью оптимизации режима работы. Для этого блоки управления оборудованием в своих алгоритмах работы должны иметь элементы искусственного интеллекта, должны быть способны к самообучению. Оснащение оборудования интеллектуальными системами мониторинга, контроля, учёта и

управления позволит обеспечить выполнение всех указанных выше принципов управления сетью, но, также, и выполнить принцип интегрированности электрической сети в экономику. Это значит, что на основе получаемой информации с систем мониторинга, контроля и учёта могут приниматься решения по управлению конфигурацией сети, не только связанные с режимами работы сети, но и с экономическими факторами. Например, интеграция в интеллектуальную сеть вводно-учётно-распределительных устройств потребителей (ВУРУ) и оснащение их системами мониторинга, контроля, учёта и управления позволит, в необходимых случаях, ограничивать потребление (при нарушении договорных условий), осуществлять технико-экономические механизмы стимулирования энергоснабжающих организаций и потребителей к повышению надёжности электроснабжения и качества электроэнергии как это предложено, например, в статьях [22, 23].

Реализация управления конфигурацией сельских электрических сетей с применением указанных принципов требует разработки систем и технических средств управления конфигурацией, которые должны базироваться на применении систем мониторинга параметров режимов работы электрической сети и систем управления коммутационными аппаратами, устанавливаемыми в ней, в том числе мультиконтактными коммутационными системами и устройствами секционирования и резервирования. Это позволит повысить эффективность систем электроснабжения сельских потребителей, сокращая затраты на функционирование при сокращении времени перерывов в их электроснабжении, времени несоответствия качества поставляемой электроэнергии и времени осуществления технологических присоединений к сельским электрическим сетям.

Результаты

Предложенные и рассмотренные выше принципы должны иметь возможность практического приложения к электрическим сетям. Проиллюстрируем их применение на примере электрической сети, показанной на рисунке 1. В сети установлены два источника электроснабжения И1 и И2, в качестве которых могут выступать как силовые трансформаторы трансформаторных подстанций (или одной двухтрансформаторной подстанции), получающие питание от централизованной системы электроснабжения, так и небольшие электростанции, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Для обеспечения возможности управления конфигурацией сеть оснащена коммутационными аппаратами, которые могут управляться автоматически, или дистанционно. Это: управляемые коммутационные аппараты УКА1 – УКА6; мультиконтактные коммутационные системы МКС-4 и МКС-3 (цифрами в МКС обозначены контактные группы, буквой В с цифрой, например, В1, В2 – номера выводов). На вводе всех потребителей S1 – S47 установлены вводно-учётно-распределительные устройства (ВУРУ1 – ВУРУ47), обеспечивающие возможность дистанционного и автоматического управления ими [24].

Принцип наблюдаемости в схеме реализуется следующим образом. Источники И1, И2, а также МКС-4, МКС-3 и все ВУРУ оснащаются встроенными в блоки их управления (БУ) датчиками параметров режимов работы сети (ДПРР), за счёт чего контролируют режим работы сети в точке их установки. Информация с ДПРР, установленных во всех МКС, ВУРУ, И, передаётся по каналам связи в виртуальную электростанцию, представляющую собой блок управления сетью (БУС), обрабатывающий входящую информацию и вырабатывающий на её основании команды управления соответствующим оборудованием, установленным в сети. Также информация с ДПРР передаётся диспетчеру сети, который может блокировать работу БУС, или корректировать выработанные им команды управления, переводить сеть на ручное управление.

На рисунке 2 показана структурная схема управления конфигурацией электрической сети, представленной на рисунке 1. Эта схема реализует принцип управляемости сети, то есть в любой момент времени на оборудование, установленное в сети может быть подана команда на регулирование того, или иного параметра, например, команда на источник электроснабжения по изменению значения выдаваемого в сеть напряжения, или команда на осуществление переключений, например, отключение одной и включение другой контактной группы МКС-4.

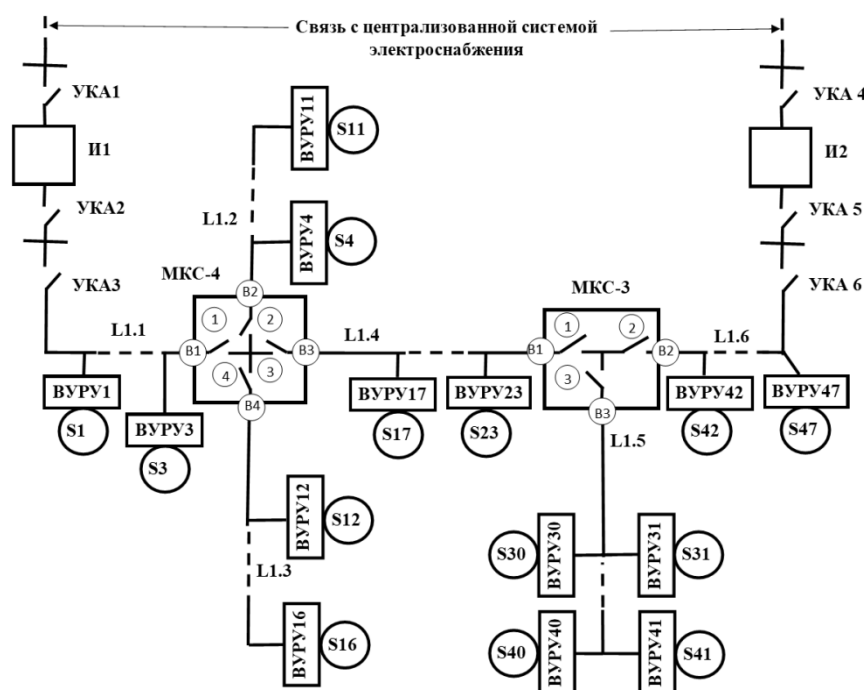


Рис. 1 Схема электрической сети с управляемой конфигурацией

Fig. 1 Diagram of an electrical network with a controlled configuration



Рис. 2. Структурная схема управления конфигурацией электрической сети, представленной на рис. 1

Fig. 2-Block diagram of the electrical network configuration control shown in Fig. 1

Принцип интеллектуализации оборудования реализуется за счёт того, что в алгоритмы работы оборудования закладываются элементы искусственного интеллекта, позволяющие ему осуществлять функционирование с оптимальными параметрами. В том числе они позволяют выполнять функции автоматизации и управления при отсутствии по какой-либо причине связи с БСУ и диспетчером по каналам связи. В этом случае оборудование, например, МКС, переходит на автономный режим работы и его переключение осуществляется исходя из значений параметров режимов работы сети, контролируемых с помощью встроенных в данное оборудование ДПРР.

Применение в схеме УКА, МКС позволяет обеспечить гибкость конфигурации сети. Предположим, что нормальным режимом является режим, при котором питание потребителей S1-S23 осуществляется от И1, а питание потребителей S24-S47 – от И2. При этом все контактные группы МКС-4 замкнуты, контактная группа 1 МКС-3 разомкнута, а контактные группы 2, 3 МКС-3 замкнуты. В этом случае линия электропередачи (ЛЭП-1), образуется участками L1.1-L1.4, питается от И1, а ЛЭП-2, образуется участками L1.5-L1.6. Представим некоторые варианты изменения конфигурации сети в таблице кодирования состояний (таблица 2). Включенное состояние источников И1, И2, контактных групп МКС,

контактов УКА в таблице показано как 1, отключенное – 0. Для упрощения таблицы положение ВУРУ не показано, предполагается, что они включены в любом случае. В таблице приведены далеко не все возможные варианты.

Таблица 2

Некоторые варианты изменения конфигурации электрической сети, показанной на рис. 1

Обору- дование	И 1	И2	УКА1	УКА2	УКА3	УКА4	УКА5	УКА6	МКС- 4	МКС- 3
Конфигурация 1. ЛЭП-1: L1.1-L1.4; ЛЭП-2: L1.5-L1.6										
Код состояния	1	1	1	1	1	1	1	1	1111	011
Конфигурация 2. ЛЭП-1: L1.1-L1.3; ЛЭП-2: L1.4-L1.6										
Код состояния	1	1	1	1	1	1	1	1	1101	111
Конфигурация 3. ЛЭП-1-2: L1.1-L1.6										
Код состояния	1	1	1	1	1	1	1	1	1111	111
Конфигурация 4. ЛЭП-1-2: L1.1-L1.6										
Код состояния	0	1	0	0	0	1	1	1	1111	111

Таким образом, переключение контактных групп МКС, а также переключение УКА позволяет формировать ЛЭП из разных участков сети, осуществлять перевод питания линий от разных источников, обеспечивая гибкость конфигурации сети.

За счёт обеспечения гибкости конфигурации выполняется и принцип сегментируемости сети, то есть возможность разделения её на автономные сегменты, или, согласно принятому зарубежом термину «острова». Предположим, что источник электроснабжения И2 – это электростанция на основе ВИЭ. В этом случае при отключенном положении УКА4 и заданном положении контактных групп МКС-3, МКС-4, таком, что связь между И1 и И2 разорвана (отключены контактные группы 1, или 2 МКС-3, 1, или 3 МКС-4, или отключен УКА3) обеспечивается автономная работа участков ЛЭП, получающих питание от И2. Соответствующие переключения МКС-3, МКС-4 позволяют распределять нагрузку, подключаемую к И1 и И2.

Принцип интегрируемости в экономику выполняется за счёт оснащения ВУРУ, МКС, И возможностями умного учёта электроэнергии. В частности, ВУРУ позволяет осуществлять ступенчатое отключение нагрузки потребителя при превышении заданного уровня потребляемой мощности, в данное устройство возможно заложить функции корректировки стоимости электроэнергии в зависимости от её качества. То есть при искажении качества электроэнергии по вине энергоснабжающей организации стоимость электроэнергии автоматически снижается для потребителя, а при искажении по вине потребителя – повышается. Аналогично реализуется механизм корректировки стоимости электроэнергии в зависимости от надёжности электроснабжения. Способы корректировки и коэффициенты повышения и понижения стоимости электроэнергии предложены в статьях [22, 23].

Возможно внедрение и механизмов, автоматически определяющих необходимые компенсационные выплаты за перерывы в электроснабжении потребителей, которые будут определяться в зависимости от количества и продолжительности перерывов за заданный интервал времени. Таким образом, рассмотренный вариант построения схемы электроснабжения с применением управляемых коммутационных аппаратов, устройств МКС и ВУРУ позволяет реализовывать все основные принципы управления конфигурацией электрической сети.

Тем не менее, на сегодняшний день недостаточно проработаны вопросы оснащения электрических сетей 0,4 кВ средствами управления их конфигурацией. На рынке практически отсутствуют устройства для секционирования и резервирования сетей 0,4 кВ [24], в том числе МКС, средства мониторинга параметров режимов работы сетей, автоматизированные вводно-учётно-распределительные устройства. В основном это оборудование имеется в виде экспериментальных, опытных образцов, требуется получение опыта эксплуатации для организации их серийного производства. Необходимо

разрабатывать и новые устройства автоматизации электрических сетей, которые могут быть интегрированы в системы управления конфигурацией.

Заключение

Управление конфигурацией электрических сетей позволяет сокращать количество и время перерывов в электроснабжении потребителей, количество случаев и время несоответствия качества поставляемой потребителям электроэнергии и, косвенно, повышать доступность энергетической инфраструктуры. К основным принципам управления конфигурацией электрической сети следует относить наблюдаемость, управляемость, гибкость конфигурации, сегментируемость электрической сети, а также интеллектуализацию оборудования и интегрированность в экономику. Внедрение указанных принципов требует большой работы по разработке новых технических средств мониторинга параметров режимов работы электрических сетей, в том числе низкого напряжения, а также новых устройств секционирования и резервирования, средств регулирования показателей качества электроэнергии и других.

Литература

1. Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Пнев, и др. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6 Е.Р. 35 кВ // *Электричество*. 2019. №. С. 10-17.
2. Виноградов А.В. Понятие и принципы управления конфигурацией интеллектуальных электрических сетей // *Агротехника и энергообеспечение*. 2020. №4 (29). С. 5–14
3. Afroz A., Vinay P., Biswarup D. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates // *Electric Power Systems Research*. 2016. V. 140. pp. 619–630.
4. Moradi A., Fotuhi-Firuzabad M., Rashidi-Nejad M. A reliability cost/worth approach to determine optimum switching placement in distribution systems (Conference Paper) // *Proceedings of the IEEE/PES Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference - Asia and Pacific; Dalian; China. 15-18 August 2005. Article number 1547169*, pp. 1-5.
5. Popovic Z., Knezevic S., Brbaklic B. Optimal number, type and location of automation devices in distribution networks with distributed generation // *International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) Workshop, Helsinki. 14-15 June 2016. pp. 1-4. doi: 10.1109/PTC.2015.7232280*
6. Moradi A., Fotuhi-Firuzabad M. Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. V. 23. N 1. pp. 271-279. doi: 10.1109/TPWRD.2007.905428.
7. Elsaiah S., Benidris M., Mitra J. Reliability improvement of power distribution system through feeder reconfiguration // *2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Durham, UK. 2014. pp. 1-6. doi: 10.1109/PMAPS.2014.6960676*.
8. Skala P., Detfich V., Spacek Z., et al. Some features of possible solutions of installing telecontrolled section switches and reclosers in the MV overhead network // *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada. 2009. pp. 1-7*.
9. Amanullah B., Chakrabarti S., Singh S.N. Reconfiguring Power Distribution Systems using Probabilistic reliability models // *IEEE transactions on power delivery*. 2012. V. 27. N. 2. pp 918-925.
10. Silva de Assis L., Gonzalez J.F.V., et al. Optimal distribution of Remote-controlled Switches in Radial Distribution Systems // *IEEE General Meeting of the Society of Energy and Power Engineering*. 2012. V. 25. N. 3. pp. 1-8.
11. Qin Q., Wu N.E. Recloser and sectionalizer placement for reliability improvement using discrete event simulation // *2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA. 2014. pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2014.6938966*.
12. Chouhan S., Inan H. and Feliachi A. Optimal number and placement of automated sectionalizing switches for smart grid Distribution Automation // *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA. 2016. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741820*.
13. Nosratabadi S., Hooshmandn R., Gholipour E.A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 67. pp. 341–363. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.025.
14. Moutis P., Hatziaargyriou N.D. Decision Trees-Aided Active Power Reduction of a Virtual Power Plant for Power System Over-Frequency Mitigation // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. V. 11. N. 1. pp. 251-261. doi: 10.1109/TII.2014.2371631.

15. Zhang L., Gari N., Hmurcik L. Energy management in a microgrid with distributed energy resources // *Energy Convers Management*. 2014. V. 78. pp. 297–305.
16. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A., et al. Analysis of the Power Supply Restoration Time after Failures in Power Transmission Lines // *Energies*. 2020. V. 13. N. 2736. pp. 1-18. doi:10.3390/en13112736
17. Vinogradov A., Vasiliev A., Bolshev V., et al. Time Factor for Determination of Power Supply System Efficiency of Rural Consumers // *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. 2018. (pp. 394-420). doi:10.4018/978-1-5225-3867-7.ch017.
18. Виноградов А.В. Разработка принципов управления конфигурацией сельских электрических сетей и технических средств их реализации: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве / Виноградов А.В. ФГБНУ ФНАЦ Вим. Москва. 2021. 527 с.
19. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Псарёв А.И. Пункт секционирования до 1 кВ, совмещенный с пунктом учета электроэнергии и контроля качества электроэнергии, контроля количества и времени отключения напряжения. Патент №2736542 Российская Федерация, МПК H02B 7/06 // Заявитель и патентообладатель ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Заявка 2020111342, заявлено 19.03.2020; опубл. 18.11.2020, Бюл. № 32.
20. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Псарёв А.И., et al. Методика выбора мест установки и количества универсальных секционирующих пунктов с функцией АВР в электрической сети 0,38 кВ по критерию обеспечения чувствительности защитных аппаратов // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2019. №3(57). С. 38-49.
21. Голиков И.О. Перспективы развития систем адаптивного автоматического регулирования напряжения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. №1(30). С. 15-22.
22. Бородин М.В. Принцип корректировки стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от её качества // *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2013. № 184-1. С. 165-171.
23. Виноградов А.В., Большев В.Е., Виноградова А.В., др. Техничко-економические способы повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. № 3 (47). С. 59-67.
24. Виноградов А.В., Загинайлов В.И., Мамедов Т.А. Вводно-учетно-распределительное устройство потребителей как элемент систем электроснабжения с распределенной генерацией 0,4 кВ // *Международный технико-экономический журнал*. 2020. №6. С. 22-30.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – канд. техн. наук, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

Виноградова Алина Васильевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

Сейфуллин Анатолий Юрьевич – аспирант, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

Букреев Алексей Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

Большев Вадим Евгеньевич – канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

References

1. Vukolov VYu, Kolesnikov AA, Pnev ER, et al. Configuration management of distribution electric networks of 6-35 kV. *E'lektrichestvo*. 2019;2;2: 10-17.

2. Vinogradov AV. The concept and principles of managing the configuration of intelligent electrical networks. *Agrotexnika i energoobespechenie*. 2020; 4 (29): 5-14.
3. Afroz A, Vinay P, Biswarup D. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates. *Electric Power Systems Research*. 2016;140:619–630.
4. Moradi A, Fotuhi-Firuzabad M, Rashidi-Nejad M. *A reliability cost/worth approach to determine optimum switching placement in distribution systems (Conference Paper)*. Proceedings of the IEEE/PES Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference - Asia and Pacific; Dalian; China; 15-18 August 2005; 1547169: 1-5.
5. Popovic Z, Knezevic S, Brbaklic B. *Optimal number, type and location of automation devices in distribution networks with distributed generation*. International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) Workshop, Helsinki. 14-15 June 2016; pp. 1-4. doi: 10.1109/PTC.2015.7232280
6. Moradi A, Fotuhi-Firuzabad M. Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008;23(1):271-279. doi: 10.1109/TPWRD.2007.905428.
7. Elsaiah S, Benidris M, Mitra J. *Reliability improvement of power distribution system through feeder reconfiguration*. 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Durham, UK; 2014; pp. 1-6. doi: 10.1109/PMAPS.2014.6960676.
8. Skala P, Detfich V, Spacek Z, et al. *Some features of possible solutions of installing telecontrolled section switches and reclosers in the MV overhead network*. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada. 2009; pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2009.5275891.
9. Amanullah B, Chakrabarti S, Singh SN. Reconfiguring Power Distribution Systems using Probabilistic reliability models. *Ieee transactions on power delivery*. 2012; 27(2): 918-925.
10. Silva de Assis L., Gonzalez J.F.V, et al. Optimal distribution of Remote-controlled Switches in Radial Distribution Systems. *IEEE General Meeting of the Society of Energy and Power Engineering*. 2012;25(3): 1-8.
11. Qin Q, Wu NE. Recloser and sectionalizer placement for reliability improvement using discrete event simulation. 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA; 2014; pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2014.6938966.
12. Chouhan S, Inan H and Feliachi A. *Optimal number and placement of automated sectionalizing switches for smart grid Distribution Automation*. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA. 2016. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741820.
13. Nosratabadi S, Hooshmandn R, Gholipour E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 67:341–363. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.025.
14. Moutis P, Hatziaargyriou ND. Decision Trees-Aided Active Power Reduction of a Virtual Power Plant for Power System Over-Frequency Mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015; 1(11): 251-261. doi: 10.1109/TII.2014.2371631.
15. Zhang L, Gari N, Hmurcik L. Energy management in a microgrid with distributed energy resources. *Energy Convers Management*. 2014;78:297–305.
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): 1-18. doi:10.3390/en13112736
17. Vinogradov A, Vasiliev A, Bolshev V, et al. Time Factor for Determination of Power Supply System Efficiency of Rural Consumers.. *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. 2018; pp. 394-420. doi:10.4018/978-1-5225-3867-7.ch017.
18. Vinogradov AV. *Development of principles for managing the configuration of rural electric grids and technical means for their implementation*: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.20.02-Electrical technologies and electrical equipment in agriculture. Moscow. 2021; 527 p.
19. Vinogradov AV, Vinogradova AV, Psarev AI. The point of partitioning up to 1 kV, combined with the point of electricity metering and quality control of electricity, control of the amount and time of voltage disconnection. Patent No. 2736542 Russian Federation, IPC N02V 7/06. declared 19.03.2020; publ. 18. 11. 2020; Byul. No. 32.
20. Vinogradov AV, Vinogradova AV, Psarev AI, et al. Methodology for selecting installation locations and the number of universal sectional points with the AVR function in the

0.38 kV electrical network according to the criterion for ensuring the sensitivity of protective devices. *Vesti vysshix uchebnykh zavedenij Chernozem'ya*. 2019;3(57): 38-49.

21. Golikov O. Prospects for the development of adaptive automatic voltage regulation systems. *Innovacii v sel'skom khozyajstve*. 2019;1(30):15-22.

22. Borodin MV. The principle of Correction of the cost of consumed electricity depending on its quality. *Naukovij visnik NUBiP Ukraïni. Seriya: Tekhnika ta energetika APK*. 2013; 184-1:165-171.

23. Vinogradov AV, Bolshev VE., Vinogradova AV, et al. Technical and economic ways to improve the efficiency of power supply systems for rural consumers. *Vestnik agrarnoj nauki Dona*. 2019; 3 (47): 59-67.

24. Vinogradov AV, Zaginaylov VI, Mamedov TA. Introductory accounting and distribution device of consumers as an element of power supply systems with distributed generation of 0.4 kV. *Mezhdunarodnyj tekhniko-e'konomicheskij zhurnal*. 2020; 6:22-30: 10.34286/1995-4646-2020-75-6.

25. Vinogradov AV, Seyfullin AY. Analysis of the concepts of building power supply systems for rural consumers containing several sources of electricity. *Vestnik NGIE'I*. 2020; 2 (105): 32-44.

Authors of the publication

Aleksandr V. Vinogradov –Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: winaleksandr@gmail.com

Alina V. Vinogradova – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Anatoliy Yu. Seyfullin – Moscow, Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Alexey V. Bukreev – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Vadim E. Bolshev – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Получено 05.04.2021 г.

Отредактировано 09.04.2021 г.

Принято 23.04.2021 г.



АКТУАЛИЗАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОМЕЩЕНИЙ ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ВСТРОЕННЫХ В ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.Р. Ахметшин^{1,2,*}, В.И. Солуянов³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

³АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Резюме. ЦЕЛЬ. Определить состав потребителей электроэнергии в многоквартирных жилых домах. Провести анализ электропотребления организаций, расположенных на первых двух этажах многоквартирных жилых домов. Обосновать необходимость актуализации нормативов удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания. МЕТОДЫ. Информация по электропотреблению получена посредством автоматизированной системы учёта электроэнергии от интеллектуальных счетчиков, установленных непосредственно у потребителей. Для выполнения поставленной цели были использованы статистические методы анализа электропотребления. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, представлено обоснование по корректировке нормативных значений удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания. На примере десятков многоквартирных домов приведено процентное соотношение групп потребителей. Представлены годовые удельные среднемесячные графики электропотребления: магазинов, офисов, аптек, предприятий общественного питания. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Стремясь повысить уровень комфорта, застройщики заинтересованы в развитии инфраструктуры объектов, в основном для этого используют первые и вторые этажи, в которых чаще всего располагаются торгово-офисные помещения. Исследования Ассоциации «Росэлектромонтаж» показали, что для определения электрической нагрузки нежилых коммерческих помещений приходится использовать одно усредненное значение в связи с постоянной сменой назначения помещений и сложностью определения занимаемой площади.

Ключевые слова: удельные расчетные электрические нагрузки, электропотребление помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания, запертая электрическая мощность, резервная электрическая мощность, проектирование жилых комплексов.

Для цитирования: 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. Т. 23. № 3. С. 47-57. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57.

UPDATE OF SPECIFIC ELECTRIC LOADS OF PUBLIC PREMISES LOCATED IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Yu.I. Soluyanov^{1,2,3}, A.R. Akhmetshin^{1,2,*}, V.I. Soluyanov^{1,3}

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

³JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Abstract. THE PURPOSE. To determine the composition of electricity consumers in apartment buildings. To analyze the power consumption of organizations located on the first two floors of apartment buildings. To justify the need to update the standards for electrical loads for public premises built into residential buildings. METHODS. Information on electricity consumption was received by automated electricity metering system from smart meters installed directly at

consumers. To achieve this goal, statistical methods for analyzing energy consumption were used. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, provides a rationale for adjusting the normative values of specific electrical loads for public premises built into residential buildings. The percentage of consumer groups is shown on the example of several apartment buildings. The annual specific average monthly graphs of electricity consumption are presented: shops, offices, pharmacies, restaurants. CONCLUSION. In an effort to increase the level of comfort, developers are interested in developing the infrastructure of the facilities, mainly for this, they use ground and first floors, in which retail and office areas are most often located. Research by the Roselectromontazh Association has shown that to determine the electrical load of non-residential commercial premises, one has to use one averaged value due to the constant change in the purpose of premises and the complexity of determining the occupied area.

Keywords: specific design electrical loads, power consumption of public premises built into residential buildings, locked electrical power, reserve electrical power, design of residential complexes.

For citation: Soluyanov YuI, Akhmetshin AR., Soluyanov VI. Update of specific electric loads of public premises located in residential buildings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):47-57. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57.

Введение

В состав современных жилых комплексов входят не только дошкольные образовательные и общеобразовательные учреждения, но и помещения общественного назначения, встроенные (встроенно-пристроенные)¹ (ПОН) в многоквартирные жилые дома (МКД). Стремясь повысить уровень комфорта, застройщики заинтересованы в развитии инфраструктуры объектов [1]. Наличие внутри жилого комплекса набора необходимых организаций повышает ликвидность недвижимости. Вместе с тем, строительство отдельно стоящего здания более затратное мероприятие, по сравнению с выделением первых этажей, а иногда первых двух-трёх этажей, под объекты социального, культурного и бытового назначения. Большую часть нежилых ПОН занимают торгово-офисные организации.

Проведенные исследования в Республике Татарстан (РТ) Ассоциацией «Росэлектромонтаж» (Ассоциация) [2] показали, что фактическая загрузка 53% силовых трансформаторов (СТ), расположенных в жилом секторе, в максимальном режиме не превышает 15% [2]. Малая загрузка СТ свидетельствует о повышенных потерях в них [3, 4]. Причина возникновения данной проблемы - устаревшие нормативные документы², которые не пересматривались с прошлого века. Для решения данной проблемы Ассоциацией по заданию ОА «Сетевая компания» была выполнена научно-исследовательская работа в части актуализации удельных электрических нагрузок МКД. И в 2019 г. внесены изменения в нормативные документы², что позволило застройщикам экономить до 50% инвестиций, необходимых для технологического присоединения к электрическим сетям [5].

Необходимо отметить, что свой вклад в образование «запертой мощности» вносят и объекты социального, культурного и бытового назначения. Так как за последние десятилетия изменился как состав, так и энергоэффективность электропотребителей этих объектов [6]. Структура и величина потребления электрической энергии в регионах значительно различна [7], например, домашние хозяйства/социальная, культурная и бытовая сферы в г. Москве составляют: 23%/31%, в Московской области: 18%/12%, в Республике Татарстан: 12,3%/11,8%, в Белгородской области: 10%/6%. Поскольку электропотребление организаций, расположенных в нежилых ПОН, может занимать значительную часть от общего электропотребления МКД, было проведено исследование для определения разницы между фактической и расчетной нагрузками.

По результатам исследования в РТ были внесены изменения в 2019 г. в таблицу 7.142³ «расчетные данные, приведенные в таблице, могут корректироваться для конкретного применения с учетом местных условий. При наличии документированных и утвержденных в установленном порядке экспериментальных данных расчет нагрузок следует производить по ним» [8].

Выполнение работы по актуализации удельных электрических нагрузок, встроенных в жилые здания ПОН, в дополнении к снижению стоимости строительства и потерь

¹ СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003»

² Постановление Кабинета Министров Республики Татарстан от 27.12.2013 № 1071 «Об утверждении республиканских нормативов градостроительного проектирования Республики Татарстан»

электроэнергии, повысит качество предоставления государственных услуг. Для бизнеса подключение к электрическим сетям является ключевым вопросом в «Национальном рейтинге состояния инвестиционного климата» для регионов.

Литературный обзор

Как отмечалось выше, объекты социальной, культурной и бытовой сферы в РТ занимают 11,8% в структуре электропотребления РТ. Как правило, большая часть из них располагается в ПОН, встроенных (встроенно-пристроенных) в жилые дома. В ПОН могут размещаться следующие категории потребителей электроэнергии (таблице 7.14³):

- предприятия общественного питания;
- продовольственные и промтоварные магазины;
- общеобразовательные учреждения (включая детские сады и ясли);
- кинотеатры и киноконцертные залы (включая клубы и парикмахерские);
- здания или помещения учреждений управления, проектных и конструкторских организаций;
- гостиницы (включая дома отдыха, детские лагеря, пансионаты, фабрики, химчистки и прачечные самообслуживания).

Однако существуют ограничения по возможностям использования ПОН первых этажей МКД со стороны градостроительных нормативов. В своде правил⁴ приведены соответствующие разделы по рассматриваемому вопросу:

- здание может включать в себя встроенные, встроенно-пристроенные, пристроенные ПОН, общественного назначения и стоянки автомобилей, размещение, технологии производства и режим работы которых соответствуют требованиям безопасности проживания жильцов при эксплуатации МКД и прилегающих территорий в застройке. Размещение в жилых зданиях промышленных производств не допускается;
- в подвальном, цокольном, первом и втором этажах жилого здания (в крупных и крупнейших городах - на третьем этаже) допускается размещение встроенных и встроенно-пристроенных ПОН, за исключением объектов, оказывающих вредное воздействие на человека.

- в цокольном и подвальном этажах жилых зданий не допускается размещать помещения для хранения, переработки и использования в различных установках и устройствах легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и сжиженных газов, взрывчатых веществ; помещения для пребывания детей; кинотеатры, конференц-залы и другие зальные помещения с числом мест более 50, сауны, а также лечебно-профилактические учреждения.

Также согласно действующим законам⁵ допускается использование жилого помещения для осуществления профессиональной деятельности или индивидуальной предпринимательской деятельности проживающими в нем на законных основаниях гражданами, если это не нарушает права и законные интересы других граждан, а также требования, которым должно отвечать жилое помещение.

В качестве примера в табл.1 представлен состав организаций, размещенных в нежилых ПОН, для нескольких МКД.

Таблица 1

Состав организаций, расположенных на первом этаже МКД

№	Адрес	Состав организаций	Всего, шт.
1	г. Казань, ул.Адоратского д.27.	Парикмахерские – 3 шт.; Аптеки – 4 шт.; Продовольственные магазины – 3 шт.; Промтоварные магазины – 5 шт. Предприятия общественного питания – 3шт. Банки – 2 шт. Медицинские организации – 2 шт.; Офисные помещения – 5 шт.	27 шт.
2	г. Казань, ул. Чуйкова д.69	Парикмахерские – 1 шт.; Аптеки – 3 шт.; Продовольственные магазины – 1 шт.; Промтоварные магазины – 15 шт.	37 шт.

³ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»

⁴ СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003»

⁵ «Жилищный кодекс Российской Федерации» от 29.12.2004 N 188-ФЗ

		Предприятия общественного питания – 2 шт. Ателье – 1 шт. Медицинские организации – 2 шт.; Офисные помещения – 12 шт.	
3.	г. Казань, ул.Чистопольская д.15	Парикмахерские – 2 шт.; Аптеки – 2 шт.; Промтоварные магазины – 3 шт. Медицинские организации – 2 шт.; Офисные помещения – 4 шт.	13 шт.

В современных условиях, когда разрыв между фактическими и расчетными значениями электрической нагрузки увеличивается ввиду того, что нормативные значения⁶ устарели, а электрические приборы становятся более энергоэффективными [9,10], 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 [11].

Материалы и методы

Данные по электропотреблению ПОН и жилым помещениям МКД получены от АО «Сетевая компания». Проведен сравнительный анализ электропотребления разных групп за зимний период (максимальной электрической нагрузкой) 2020 г. В качестве примера на рис. 1 представлена гистограмма соотношения электропотребления для 3 группы⁷.

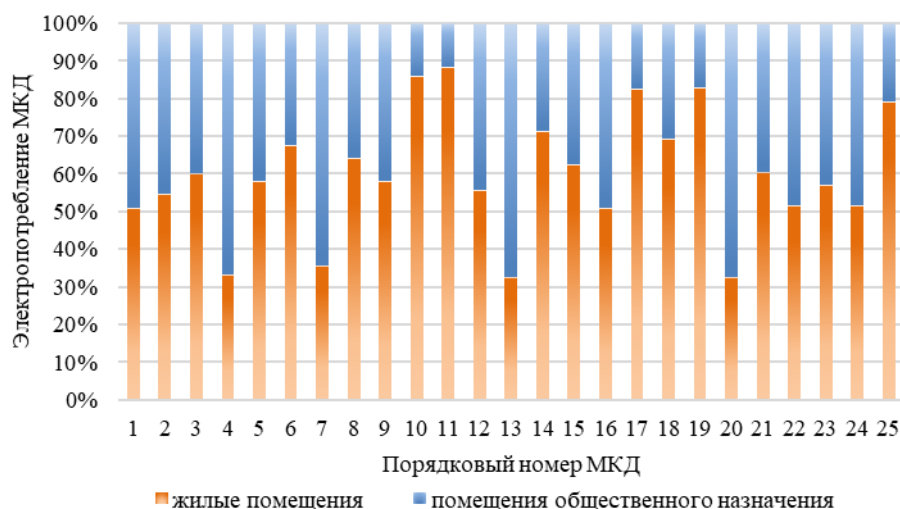


Рис.1. Соотношение электропотребления помещений общественного назначения и жилых помещений МКД

Fig. 1 The ratio of electricity consumption of public premises and residential premises of the MCD

Рисунок 1 демонстрирует, что электропотребление ПОН составляет от 10 до 68% общего электропотребления МКД. Следует отметить, что чем выше МКД, тем меньше доля электропотребления ПОН.

Проведённое обследование 357 МКД показало, что наиболее часто встречающиеся следующие категории потребителей:

1. Аптеки;
2. Магазины;
3. Офисы;
4. Предприятия общественного питания.

За период с 2017 до 2020 г. проведено исследование в г. Казани по электропотреблению 33 аптек, (рис. 2а), 54 магазинов (продовольственных и универсальных), (рис. 2б), 35 офисов, (рис. 2в), 21 предприятия общественного питания, (рис. 2 г).

⁶ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»

⁷ Постановление Кабинета Министров Республики Татарстан от 27.12.2013 № 1071 «Об утверждении республиканских нормативов градостроительного проектирования Республики Татарстан»

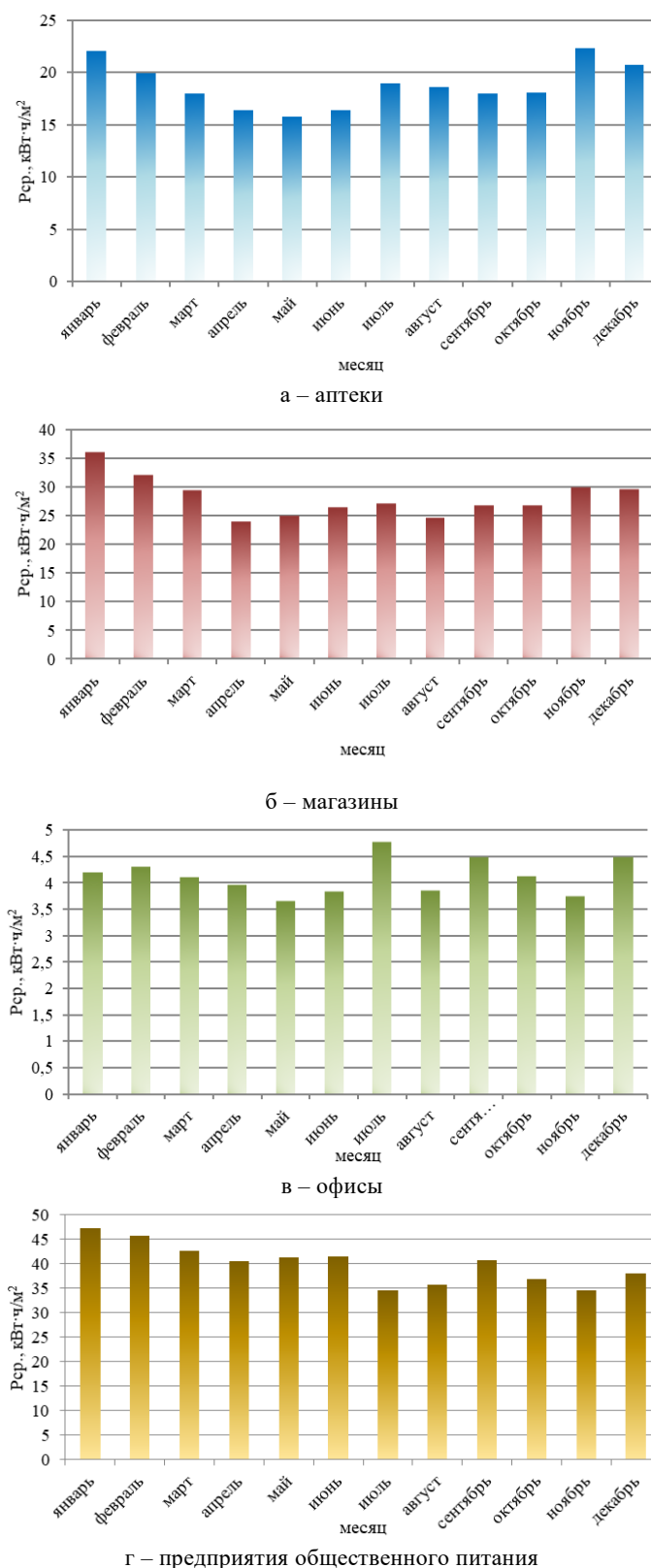


Рис. 2. Удельное годовое среднеемесячное
электропотребление

Fig. 2. Specific annual average monthly power
consumption

Рассмотрев рисунок 2, можно сделать вывод, что наиболее энергоемкими являются аптеки, магазины и предприятия общественного питания, для них характерны зимние максимумы. Напротив, энергоемкость офисов значительно ниже без проявления характерных максимумов.

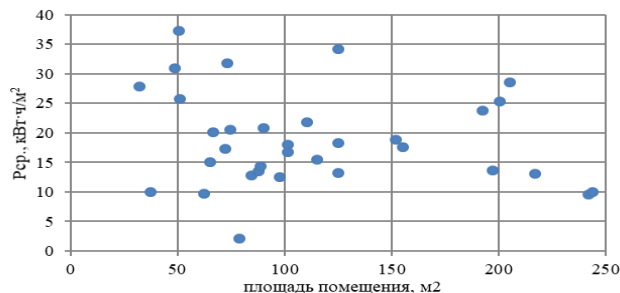
Информация о электропотреблении организаций, расположенных на первых этажах МКД, получена по средствам автоматизированной системы учёта электроэнергии от интеллектуальных счетчиков, установленных непосредственно у потребителей.

Интеллектуальные счетчики электроэнергии также позволяют:

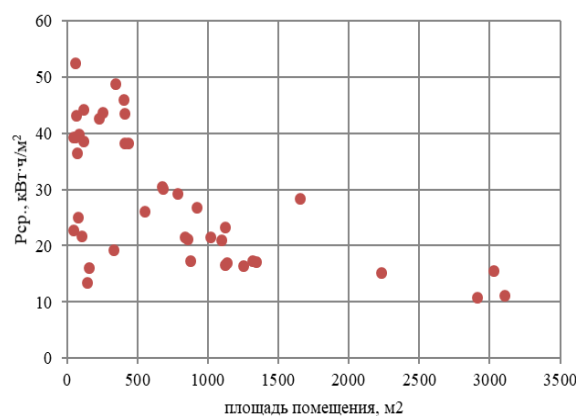
- своевременно актуализировать коэффициенты спроса и одновременности и несовпадения максимумов [12-14];
- снижение потерь электроэнергии в линиях электропередач и силовых трансформаторах, за счет выявления участков с завышенными потерями электроэнергии [15,16];
- определение источника, ухудшающего качество электроэнергии [17,18];
- определение мест для установки устройств компенсации реактивной мощности [19-21] и т.д.

Результаты

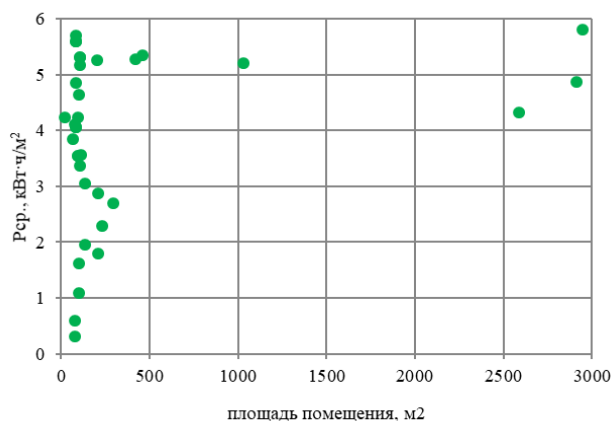
Расчет электрической нагрузки ПОН предлагается проводить, используя удельные значения электрической нагрузки на 1 м². Для определения зависимости удельного месячного электропотребления от площади произведены соответствующие исследования, рис. 3.



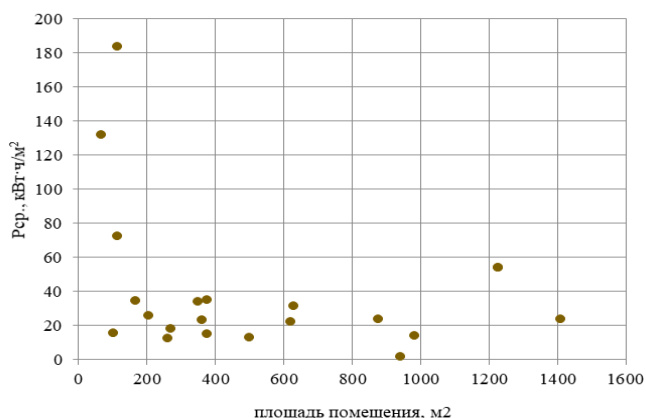
а – аптеки



б – магазины



в – офисы



г – предприятия общественного питания

Рис. 3. Удельное месячное электропотребление в зависимости от площади помещений общественного назначения

Fig. 3. Specific monthly power consumption depending on the area of public premises

На рисунке 3а представлено удельное месячное электропотребление в зависимости от площади для аптек, 3б-магазинов, 3в-офисов, 3г-предприятий общественного питания. Как видно из графика, явной зависимости нет, то есть можно ввести одно усредненное значение удельной нагрузки для всех ПОН в расчете на 1 м². В пользу введения одного усредненного значения удельной электрической нагрузки говорит тот факт, что на практике определить какой группой потребителей будет использоваться ПОН крайне сложно. Также в процессе эксплуатации ПОН может изменяться при смене арендаторов (владельцев) помещения, что происходит довольно часто (к примеру, офисные помещения могут смениться на помещения предприятия общественного питания и наоборот). Но однозначно подтвердить это можно, проведя исследование профилей электрической нагрузки.

Для определения возможности применения одного усредненного значения удельной электрической нагрузки выполнено суммирование месячного электропотребления ПОН, находящихся в МКД, поделённое на общую площадь, которую они занимают, рис. 4.

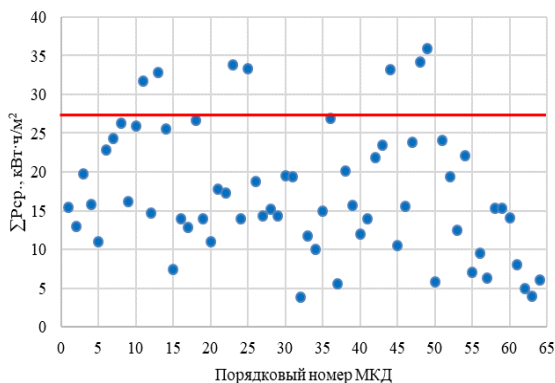


Рис. 4. Суммарное месячное удельное электропотребление помещений общественного назначения в МКД

Fig. 4. Total monthly specific power consumption of public premises in the MCD

Из рисунка 4 видно, что суммарное месячное удельное электропотребление у 90 % выборки находится ниже значения 28 кВт·ч/м². На рисунке 5 представлена зависимость месячного удельного электропотребления от площади, занимаемой ПОН.

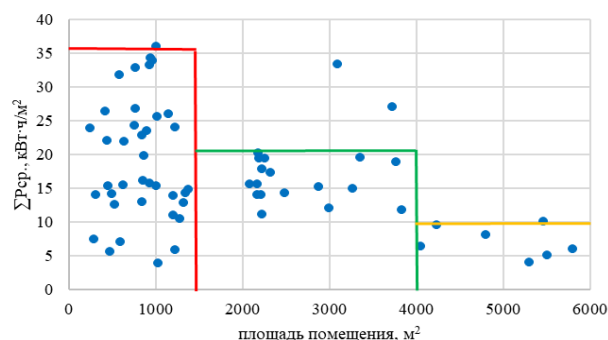


Рис. 5. Суммарное месячное удельное электропотребление помещений общественного назначения в зависимости от площади

Fig. 5. The total monthly specific power consumption of public premises, depending on the area

Рисунок 5 явно иллюстрирует зависимость электропотребления от площади, занимаемой ПОН, что позволяет разбить потребителей на три группы и определить для них удельные месячные значения электропотребления:

- от 0 до 1500 м² – 36 кВт·ч/м²;
- от 1501 до 4000 м² – 21 кВт·ч/м²;
- свыше 4001 м² – 10 кВт·ч/м².

Обсуждение

Размещать организации внутри жилых домов следует в специально спроектированных и построенных нежилых помещениях. Размещение коммерческих предприятий в жилых квартирах первых этажей в настоящее время в городах РТ практически не практикуется.

Как правило, заранее редко известно, что именно будет располагаться в том или ином нежилом помещении МКД. Во вновь вводимых МКД потребители имеют собственное, независимое внутреннее распределительное устройство, запитываемое напрямую от трансформаторной подстанции [1,8,22,23]. Данное решение приемлемо для расчета предполагаемой электрической нагрузки на первых двух стадиях проектирования (эскизный проект и стадия проект), когда формируется заявка на технологическое присоединение к электрическим сетям [1,2,22-25].

Использование одного усредненного значения удельной электрической нагрузки ПОН - ожидаемый результат, учитывая, что прогнозирование электрических нагрузок носит вероятностный характер.

Предлагаемое решение даёт большую степень свободы при отсутствии исходных данных как для электроснабжающей организации, так и для реального собственника-предпринимателя в дальнейшем.

Для внесения изменений в нормативные документы необходимы данные по получасовым профилям электрической нагрузки [2,5,11]. Полученные удельные значения электропотребления можно будет в дальнейшем использовать для определения удельной расчетной электрической нагрузки.

Выводы

1. Неотъемлемой частью многих МКД является ПОН, которые заложены в проектах на первых этажах.
2. Необходим пересмотр нормативных документов в части удельных электрических нагрузок ПОН, так как за время последнего обновления нормативных значений изменился не только состав, но и энергоэффективность электроприборов.
3. Необходимо обеспечить мониторинг электрических нагрузок потребителей предприятий социального, культурного и бытового назначения для своевременной актуализации нормативных документов. Решение данного вопроса позволит своевременно сокращать стоимость технологического присоединения к электрическим сетям.
4. Поскольку определить какой группой потребителей будет использоваться помещение в будущем крайне сложно, было предложено введение одного усредненного значения удельной электрической нагрузки.
5. Выявлена зависимость суммарного удельного электропотребления от площади, занимаемой ПОН (чем больше занимаемая площадь, тем меньше удельное электропотребление).

Литература

1. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Москва: ИД «ФОРУМ» ИНФРА-М, 2017. 416 с.
2. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Актуализация расчетных электрических нагрузок с последующим практическим применением на примере Республики Татарстан // Промышленная энергетика. 2021. № 2. С. 32-40.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Халтурин В.А., и др. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 5 (62). С. 68-73.
9. 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.
10. 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. Vol. 6. Iss. 5. pp. 7659-7669.
11. 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.
12. Albert A., Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28. Iss. 4. pp. 4019-4030.
13. 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.
14. Bicego M., Farinellia A., Grosso E., et al. On the distinctiveness of the electricity load profile // Pattern Recognition. 2018. Vol. 74. pp. 317-325.
15. Федотов А.И., Ахметшин А.Р. Мероприятия по увеличению пропускной способности линий электропередач в распределительных сетях 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 5-6. С. 79-85.
16. Ledva G.S., Mathieu J.L. Separating feeder demand into components using substation, feeder, and smart meter measurements // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020 Vol. 11. Iss. 4. pp.3280-3290.
17. 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. Vol. 54. Iss. 3. pp. 2714-2726.
18. 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. П.Е. Алексеева. 2016. №3 (114). С. 85–94.
19. 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.
20. Liu Y.-W., Rau S.-H., Wu C.-J., et al. Improvement of power quality by using advanced reactive power compensation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. Iss. 1. pp. 18-24.

21. Benidris M., Sulaeman S., Tian Y., et al. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems // IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. 2016, art. no. 7519910.

22. Carroll P., Murphy T., Hanley M., et al. Household classification using smart meter data // Journal of official statistics. 2018. Vol. 34. No1. pp. 1-25.

23. 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.

24. 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.

25. Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. Принципы построения модели энергетического хаба // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 3 (43). С. 3-12.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж».

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет, ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Солуянов Владимир Иванович – главный инженер, КМУ-2 АО «Татэлектромонтаж».

References

1. Opoleva GN. *Ehlektrsnabzhenie promyshlennykh predpriyatii i gorodov*. Moscow: Publishing House FORUM INFRA-M; 2017.

2. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Actualization of calculated electrical loads with subsequent practical application on the example of the Republic of Tatarstan. *Industrial energy*. 2021; 2:32-40.

3. Nadtoke 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.

4. Nadtoke 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.

5. Soluyanov YuI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Energy-resource-saving effect in the power supply systems of residential complexes from the actualization of the standards of electrical loads. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 1(23):156-166.

6. 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.

7. Antonov NV, Evdokimov M. Yu., Chicherov EA Problems in the assessment of 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.

8. Soluyanov YI, Fedotov AI, Khalturin VA, et al. Energy-saving solutions in distribution electrical networks based on the analysis of their actual loads. *Electricity. Transmission and distribution*. 2020; 62(5):68-73.

9. 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. doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087641.

10. 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. doi: 10.1109/JIOT.2019.2903312.

11. Soluyanov YuI, 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.
12. Albert A, Rajagopal R. Smart meter driven segmentation: what your consumption says about you. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013; 28(4):4019-4030. doi:10.1109/TPWRS.2013.2266122.
13. 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. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939378.
14. Bicego M, Farinellia A, Grosso E., et al. On the distinctiveness of the electricity load profile. *Pattern Recognition*. 2018;74:317-325. doi: 10.1016/j.patcog.2017.09.039
15. Fedotov AI, Akhmetshin AR. Measures to increase the capacity of power lines in distribution networks of 10 kV. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2011; 5-6:79-85.
16. 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. doi: 10.1109/TSG.2020.2967220.
17. 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. doi: 10.1109/TIA.2018.2803728.
18. 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; 3 (114):85–94.
19. 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. doi: 10.1109/IECON.2018.8591249.
20. Liu Y-W, Rau S-H, Wu C-J, et al. Improvement of power quality by using advanced reactive power compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(1):18-24. doi: 10.1109/TIA.2017.2740840
21. Benidris M, Sulaeman S, Tian Y, et al. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. 2016; 7519910. doi: 10.1109/TDC.2016.7519910
22. Carroll P, Murphy T, Hanley M, et al. Household classification using smart meter data. *Journal of official statistics*. 2018; 34(1):1-25. doi: 10.1515/jos-2018-0001.
23. Voropai NI, Stychinski ZA, Kozlova EV, et al. Optimization of daily load schedules of active consumers. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2014; 1:84-90.
24. 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. doi: 10.1109/GTDAAsia.2019.8715891.
25. Gerasimov DO, Suslov KV, Ukolova EV. Principles of constructing a model of an energy hub. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2019; 3(43):3-12.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir I. Soluyanov – JSC Tatelektromontazh, Kazan, Russia.

Получено 16.04.2021 г.

Отредактировано 21.05.2021 г.

Принято 24.05.2021 г.



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Н.С. Волотковская¹, А.С. Семёнов¹, Ю.В. Бебихов^{1,2}, В.А. Шевчук³, О.В. Федоров^{1,4}

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Политехнический институт (филиал), г. Мирный, Россия

²Предприятие тепловодоснабжения АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

³Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск, Россия

⁴Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

volotkovska_n@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Проанализировать сценарии развития энергетического комплекса одного из регионов Северо-Востока России на период до 2030 года с целевым видением до 2050 года. Для чего потребуется: провести анализ современного состояния энергетического комплекса; показать последние изменения в системе электроснабжения; предложить перспективные направления трансфера электроэнергии из региона и обратно. МЕТОДЫ. Для оценки современного состояния электроэнергетики, с точки зрения максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора экономики, были применены методы сбора и обработки статистических данных. Для технической оценки состояния электроэнергетических объектов были применены аналитический и логико-вероятностный методы определения надежности. Для прогнозирования энергопотребления были применены методы математического моделирования с построением аппроксимирующих полиномов. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье произведена оценка стратегического и умеренно сценариев развития энергетики Республики Саха (Якутия) в современных условиях с учетом повышения энергоэффективности экономики региона. Оценке подлежали показатели потребления электроэнергии по всей республике, Западному энергорайону и децентрализованной зоне электроснабжения. Сделанные долгосрочные прогнозы не подтверждают развитие событий согласно более жесткому стратегическому сценарию. В то же время результаты по умеренному сценарию полностью коррелируются как с текущим состоянием энергетики, так и с перспективами её развития. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Анализ текущего состояния и оценка сценариев развития энергетического сектора экономики республики показали: повышение надежности систем электроснабжения при организации «колец» в Западном энергорайоне; увеличение полезного электропотребления к 2030 г.; прирост производства электроэнергии; изменение структуры производства электроэнергии.

Ключевые слова: энергетический комплекс; электроэнергетика; энергоэффективность; потребление электроэнергии; система электроснабжения; подстанция; сценарий развития.

Для цитирования: Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Шевчук В.А., Федоров О.В. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 58-69. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ENERGY COMPLEX OF THE NORTH-EAST OF RUSSIA

NS. Volotkovskaya¹, AS. Semenov¹, YV. Bebikhov^{1,2}, VA. Shevchuk³, OV. Fedorov^{1,4}

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Polytechnic Institute (branch), Mirny,
Russia

²Heat and Water Supply Company (PJSC ALROSA), Mirny, Russia

³JSC Research and Production Center Polyus, Tomsk, Russia

⁴Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
volotkovska_n@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To analyze scenarios for the development of the energy complex of one of the regions of the North-East of Russia for the period up to 2030 with a target vision until 2050. This will require an analysis of the current state of the energy complex; show the latest changes in the power supply system; propose promising areas for the transfer of electricity. *METHODS.* To assess the current state of the electric power industry, from the point of view of the most efficient use of natural energy resources and the potential of the energy sector of the economy, methods of collecting and processing statistical data were applied. For the technical assessment of the state of electric power facilities, analytical and logical-probabilistic methods for determining reliability were applied. To predict energy consumption, mathematical modeling methods were used with the construction of approximating polynomials. *RESULTS.* The article evaluates the strategic and moderate scenarios for the development of the energy sector of the Republic of Sakha (Yakutia) in modern conditions, taking into account the increase in the energy efficiency of the region's economy. The indicators of electricity consumption throughout the republic, the Western Energy District and the decentralized power supply zone were subject to assessment. Long-term forecasts made do not confirm the development of events according to a more stringent strategic scenario. At the same time, the results for the moderate scenario are fully correlated with both the current state of the energy sector and the prospects for its development. *CONCLUSION.* Analysis of the current state and assessment of scenarios for the development of the energy sector of the republic's economy showed an increase in the reliability of power supply systems when organizing a "ring" in the Western Energy District; increase in useful electricity consumption by 2030; increase in electricity production; changes in the structure of electricity production.

Keywords: energy complex; electric power industry; energy efficiency; electricity consumption; power supply system; substation; development scenario.

For citation: Volotkovskaya NS, Semenov AS, Bebikhov YV, Shevchuk VA, Fedorov OV. Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):58-69. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

Введение и литературный обзор

Целью энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций [1-3]. Реализация энергетической политики на субфедеральном уровне влияет на объективные процессы социально-экономического развития республики, в том числе с учетом резких изменений внешних и внутренних факторов, определяющих основные параметры функционирования топливно-энергетического комплекса страны [4, 5].

При этом основные направления энергетической политики используются при разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития, программных документов по промышленному освоению территории республики, при подготовке и корректировке параметров инвестиционных программ и крупных проектов компаний энергетического сектора [6, 7].

Реализация проектов, связанных с освоением природных ресурсов, с развитием обрабатывающих производств, проектов в сфере услуг и сельском хозяйстве требует опережающего планирования развития энергетической инфраструктуры, топливно-энергетического комплекса [8, 9].

Цель, задачи и объект исследования

Целью работы является проведение анализа и оценка выполнения мероприятий утвержденной «Энергетической стратегии Республики Саха (Якутия) на период до 2030 г.», определение стратегических направлений дальнейшего развития энергетики Республики Саха (Якутия) в современных условиях с учетом повышения энергоэффективности экономики региона и роста качества жизни населения.

Задачи: анализ современного состояния энергетического комплекса республики;

оценка ресурсной базы для электроэнергетики; анализ эффективности разработанных мероприятий (сценариев) развития энергетического комплекса республики на период до 2030 г. с целевым видением до 2050 г.

Объект исследования: электроэнергетические показатели в энергетике Республики Саха (Якутия), в том числе Западного энергетического района (ЗЭР) и с учетом децентрализованного электроснабжения.

Материалы и методы

Для оценки современного состояния электроэнергетики, с точки зрения максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора экономики, были применены методы сбора и обработки статистических данных. Были использованы формы Росстата: Электробаланс за 2010-2018 гг., Топливо-энергетический баланс за 2010-2018 гг., а также форма 2п Министерства экономики РС (Я).

Для технической оценки состояния электроэнергетических объектов были применены аналитический и логико-вероятностный методы определения надежности. Авторами в работе [10] были разработаны математические модели на основе законов распределения наработки до отказа. Выбор закона распределения, в значительной мере, процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы. Для оценки надежности энергетических объектов применили экспоненциальный закон распределения.

Считается, что случайная величина наработки объекта до отказа подчинена экспоненциальному распределению, если плотность распределения отказов описывается выражением:

$$f(t) = \alpha \cdot \exp(-\alpha t),$$

где α – параметр распределения, который по результатам испытаний принимается равным $\alpha \approx 1/T_0$; T_0 – оценка средней наработки до отказа.

Средняя наработка до отказа (т.е. математическое ожидание) и её дисперсия определяются по формулам:

$$T_0 = 1/\lambda, \\ D = 1/\lambda^2,$$

где λ – интенсивность отказов.

Тогда графики изменения показателей безотказности при экспоненциальном распределении будут иметь следующий вид (рис. 1).

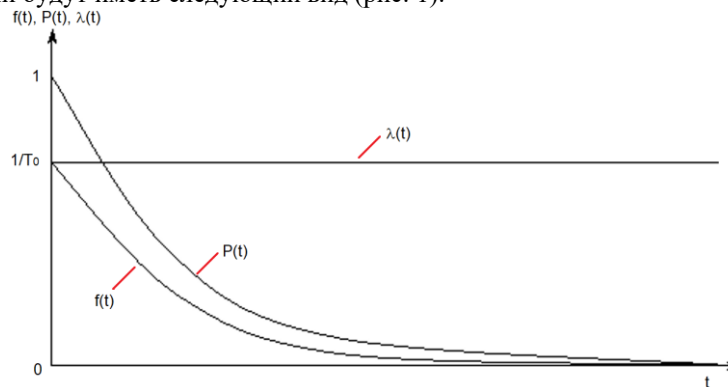


Рис.1 Графики показателей безотказности при экспоненциальном распределении: $P(t)$ – вероятность безотказной работы, $f(t)$ – плотность распределения отказов, $\lambda(t)$ – интенсивность отказов.

Fig. 1 Graphs of failure rates with exponential distribution: $P(t)$ – the probability of failure, $f(t)$ – the density of the distribution of failures, $\lambda(t)$ – the failure rate.

Особенность экспоненциального распределения заключается в том, что интенсивность отказов является постоянной величиной, не зависящей от времени, и обратно пропорциональной оценке средней наработки. Этот фактор обуславливает широкое применение экспоненциального распределения для оценки надежности энергетических объектов.

Для прогнозирования энергопотребления были применены методы математического моделирования с построением аппроксимирующих полиномов. Исходными данными для построения являлись статистические данные, оцененные в первой части работы и проанализированные ранее авторами в [11]. В программе MatLab предусмотрена функция

$\text{polyfit}(x,y,n)$, реализующая метод наименьших квадратов. Предварительно нужно задать вектора значений функции y и аргумента x . Обоснованно выбрать степень полинома можно путём вычисления табличных разностей с помощью функции $\text{dyff}(y,n)$, предпочтение отдаётся полиному с меньшими табличными разностями. Выбираем полином порядка n , так чтобы порядок полинома был на единицу меньше размерности векторов x и y , тогда график полинома будет проходить через точки этих векторов. Результатом расчёта является вектор коэффициентов полинома в порядке убывания степени x . Аппроксимирующий полином запишется в виде:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_d \cdot x^d$$

где a – расчетные коэффициенты, d – порядок (степень) полинома.

Проверить достоверность результатов аппроксимации можно с помощью оператора $\text{polyval}(a,x)$. Полное совпадение с исходными данными будет свидетельствовать о том, что данный полином можно рассматривать как математическую модель. В случае наличия неточностей, сглаживание исходных данных можно осуществить с помощью функции $\text{lsqcurvefit}(f,a_0,x,y)$, где a_0 – стартовое значение неизвестных параметров функции f .

Результаты и обсуждения

Республика Саха (Якутия) как субъект Российской Федерации входит в Дальневосточный федеральный округ и занимает почти всю северо-восточную часть азиатского материка, выходя на побережье двух морей Северного Ледовитого океана. Свыше 40% территории республики находится за Полярным кругом. Республика на востоке граничит с Чукотским автономным округом, Магаданской областью и Хабаровским краем, на юге – с Забайкальским краем, Амурской и Иркутской областями, на западе – с Красноярским краем, с севера омывается морями Лаптевых и Восточно-Сибирским. Общая протяженность морской береговой линии превышает 4,5 тыс. км.

Анализ современного состояния электроэнергетики

Энергосистема Республики Саха (Якутия) состоит из трех энергорайонов – Западного, Центрального и Южно-Якутского [12]. Южно-Якутский и Западный энергорайоны имеют электрическую связь по двум одноцепным ВЛ 220 кВ «Олекминск – НПС-15 – Нижний Куранах» с отпайками на нефтеперекачивающие станции НПС-14 и НПС-16. Южно-Якутский и Центральный энергорайоны имеют электрическую связь по ВЛ 220 кВ «Нижний Куранах – Майя». Южно-Якутский энергорайон обеспечивает энергией Южно-Якутский территориально-промышленный комплекс, Нерюнгринский и Алданский промышленные и сельскохозяйственные узлы, связан двумя линиями электропередачи 220 кВ с Объединенной энергосистемой Востока. Центральный энергорайон обеспечивает энергией центральный промышленный узел и группу центральных районов. Западный энергорайон (ЗЭР) объединяет Айхало-Удачинский, Мирнинский, Ленский промышленные узлы и группу вилюйских сельскохозяйственных районов, а также имеет связь с Олекминским районом (рис. 2).

2 января 2019 г. Западный и Центральный энергорайоны вошли в состав Единой энергосистемы России с включением на параллельную работу с Объединенной энергосистемой Востока. Республика Саха (Якутия) имеет внешние электрические связи с Амурской, Иркутской и Магаданской энергосистемами, а также с Чаун-Билибинским энергоузлом Чукотского автономного округа.

Зона децентрализованного электроснабжения включает в себя обширную территорию республики с большим количеством автономных электростанций, которые снабжают отдельные поселки и горнодобывающие предприятия [13]. Зона действия автономной энергетики охватывает площадь 2,2 млн. км² (64%) с 15% проживающего в республике населения. Основная часть мощности автономных электростанций (около 200 МВт) расположена на территории так называемого Северного энергорайона и в объеме электропотребления республики занимает примерно 29% [14].

В условиях, сложившихся в Западном энергорайоне, учитывая большие мощности выработки электроэнергии и очень большие расстояния передачи электрической энергии от источников к потребителям, а также сложные климатические условия, помимо сетей напряжением 110 кВ запущены в эксплуатацию (с 2019 г.) и новые ЛЭП 220 кВ [15].

Если ранее ЛЭП 110 и 220 кВ выполнялись в одноцепном, двухцепном и трехцепном (от каскада Вилюйских ГЭС на п. Айхал) исполнении, то вновь запущенная в работу электрическая сеть 220 кВ выполнена по схеме кольца (рис. 2) и охватывает площадь более 50 000 км², при этом значительно повышая одно из основных требований, предъявляемых к электроснабжению объектов потребителей, а именно надежность/бесперебойность [16]. На однолинейной схеме, представленной на рис. 3, наглядно видно исполнение электрических соединений узловых подстанций.

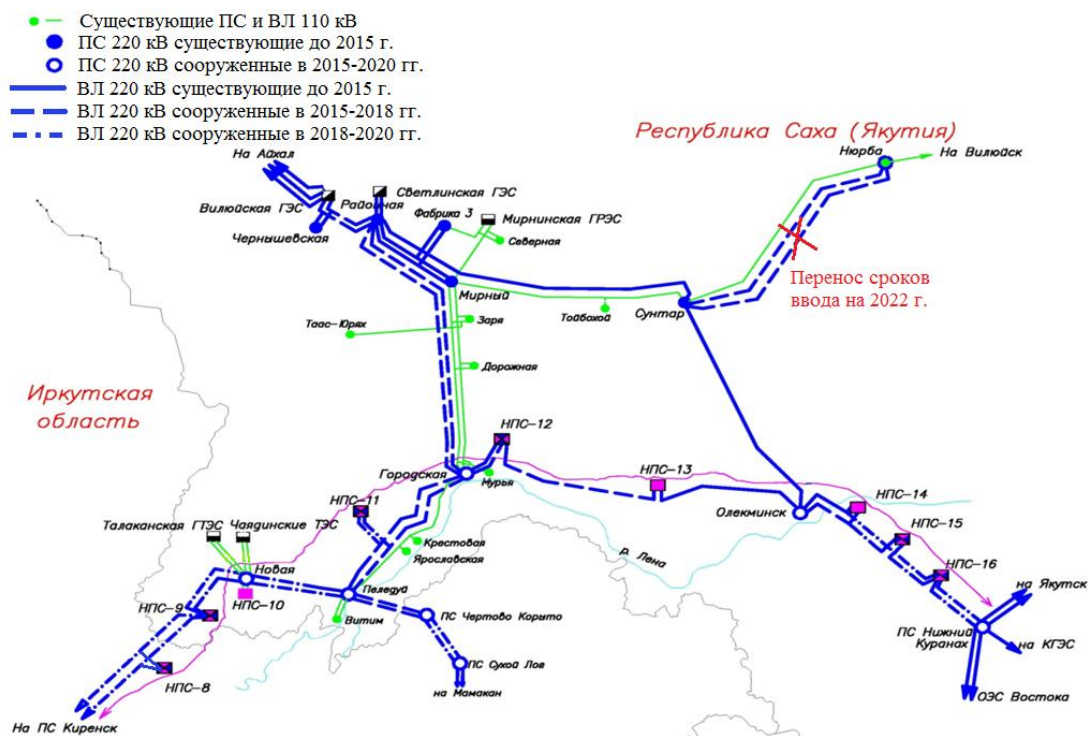


Рис.2 Карта энергосистемы Западного энергорайона

Fig. 2 Map of the power system of the Western Energy District

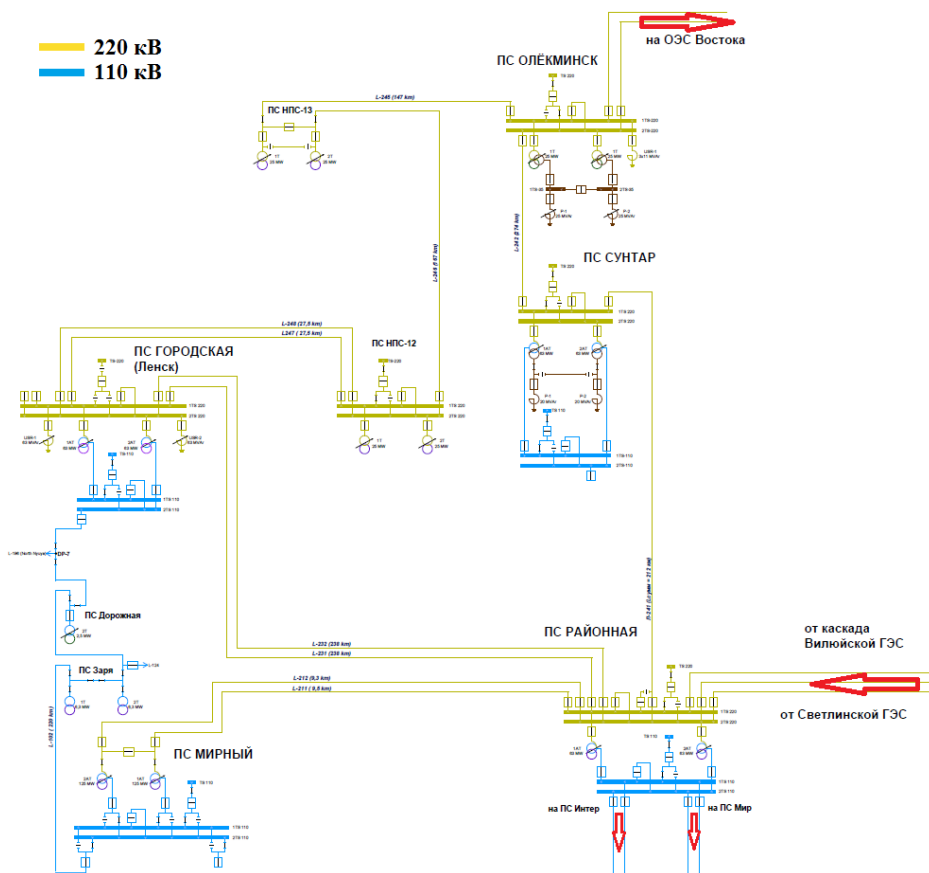


Рис.3 Однолинейная кольцевая схема электроснабжения Западного энергорайона республики

Fig. 3 Single-line circular scheme of power supply in the Western energy district of the Republic

Преимуществом кольцевой схемы помимо надежности электроснабжения является

независимость потоков в секциях ПС от потоков в самой сети высокого напряжения, что особенно важно в послеаварийных режимах и дает возможность применения более простых устройств релейной защиты и автоматики, и как правило, более низкие уровни токов короткого замыкания. Такая система является достаточно гибкой, приспособляемой к разным режимам распределения мощности, возникающим в результате изменений нагрузок в узлах потребителей, а также при плановых или аварийных отключениях, производимых в сети. Конфигурация и параметры сети обеспечивают возможность ее дальнейшего развития без коренных изменений, а именно включение вновь вводимых проходных подстанций в расщелку существующей кольцевой ЛЭП, например, нефтеперекачивающие и компрессорные станции (НПС-11,14,16,17, КС-1,2). Все они являются подстанциями глубокого ввода 220/6-10 кВ при большом сосредоточении нагрузок.

В настоящее время кольцевая сеть выполнена в железобетонных опорах ВЛ-220 кВ и присоединяется к каскаду Вилюйских ГЭС 1 и 2, а также к Светлинской ГЭС (общая установленная мощность 957,5 МВт) через узловую ПС «Районная» и является одноконтурной кольцевой схемой с несколькими узловыми точками (точка сети с присоединением более двух линий). Еще три узловые подстанции кольца находятся в п. Сунтар (ПС «Сунтар»), п. Олекминск (ПС «Олекминск») и г. Ленск (ПС «Городская»). В эксплуатации находятся и ранее существующие высоковольтные линии в деревянных опорах напряжением 110 кВ от ПС «Мирный» до ПС «Городская», которая идет далее до ПС «Пеледуй», и от ПС «Мирный» до ПС «Сунтар», которая идет далее в поселки Вилюйской группы улусов.

От ПС «Сунтар» ЛЭП-110 кВ идет далее на ПС «Нюрба», ПС «Верхневилуйск» и ПС «Вилуйск», тем самым давая возможность в перспективе соединения Западного энергорайона с системой Центрального энергорайона республики. ЛЭП-220 кВ и существующая ранее ЛЭП-110 кВ от ПС «Городская» до ПС «Пеледуй» осуществляет передачу электрической энергии золотодобывающим предприятиям Бодайбинского района Иркутской области, а также объектам нефтепроводов ВСТО и Сила Сибири. Также на территории ЗЭР автономно функционируют электростанции ОАО «Сургутнефтегаз» суммарной установленной мощностью 194,4 МВт.

В конце 2019 г. завершено строительство ВЛ 220 кВ «Пеледуй – Сухой Лог» с ПС 220 кВ «Сухой Лог» и далее на ПС «Мамакан» 1 и 2, что позволило завершить формирование кольца 220 кВ «Пеледуй – Сухой Лог – Таксимо – Мамакан – Усть-Кут – НПС-9 – Пеледуй».

Однако, есть и отрицательные результаты. Анализ показателей безотказности при помощи экспоненциального закона распределения наработки до отказа по статистическим данным электрических сетей ПАО «Якутскэнерго» показал, что удельное число отказов воздушных линий электропередачи на 1 км в год составляет: на деревянных опорах – 3%; на железобетонных опорах – 13%; на опорах из металлических труб – 10%. Исходя из максимального срока службы опор 25-30 лет, необходимо чтобы в состоянии степени изношенности 80% находилось единовременно не более 7-10% деревянных опор магистральных электрических сетей 35-220 кВ и не более 10-12% опор распределительных электрических сетей 6-10/0,4 кВ. Однако, анализ состояния деревянных опор показывает, что такие линии 220 кВ, как Л-203, 204, 206 (идущие на Айхал на рис. 2), и линии 110 кВ – Л-108, 109, 117, 119 (идущие в сторону Вилюйска на рис. 2) эксплуатируются в «ухудшенном» состоянии, и износ воздушных линий, так же, как и степень изношенности оборудования подстанций, с каждым годом увеличивается.

Анализ предложенных сценариев развития энергетического комплекса

За последние 10 лет энергопотребление в Республике Саха (Якутия) выросло на 56%, а ежегодный потенциал энергоснабжения увеличился на 12% в связи с увеличением электропотребления, потерь электроэнергии и развитием силовой преобразовательной техники. По прогнозам производство электроэнергии за 2020 год составит 11150 млн. кВт·ч (в том числе на гидроэлектростанциях будет произведено 3500 млн. кВт·ч), а потребление выйдет на отметку 10377 млн. кВт·ч. Тогда как в 2015 году было произведено 9951 млн. кВт·ч, а потреблено 9015 млн. кВт·ч. В связи с этим возрастет и спрос на энергоресурсы. В приоритете останутся уголь – 37% и газ – 26%, а электроэнергия составит только 15% [17, 18].

Разработаны два сценария дальнейшего развития отраслей топливно-энергетического комплекса республики: стратегический (более жесткий) и умеренный. Согласно стратегическому сценарию развития экономики республики производство электроэнергии к 2030 г. увеличится по сравнению к уровню 2018 г. в 1,76 раза и составит 17,1 млрд. кВт·ч. Полезное потребление за период с 2018 г. до 2030 г. увеличится до 12,9 млрд. кВт·ч, т.е. в

1,75 раза.

Объемы электропотребления в производстве будут складываться из экономии электроэнергии, роста электропотребления производства и роста потерь электроэнергии. При этом увеличение расходов электроэнергии на собственные нужды не предвидится. Более высокий по уровню электропотребления стратегический и умеренный сценарии электропотребления по всей территории республики показаны на рис. 4.

Из графиков видно, что в Западном энергетическом районе прогнозируемое электропотребление по стратегическому сценарию будет расти не так интенсивно, как по всей республике в целом, а по умеренному сценарию к 2030 г. наблюдается даже уменьшение уровня. При этом ЗЭР потребляет в данный момент 49,4% от всего объема потребления по Якутии. Это связано с тем, что к 2030 г. завершится подземная разработка кимберлитовой трубки «Интернациональная» и оставшиеся подкарьерные запасы решено отрабатывать открытым способом [19]. Этот факт, несомненно, уменьшит электропотребление, так как электрооборудование подземного комплекса рудника «Интернациональный» имеет суммарную мощность более 30 МВт [20].

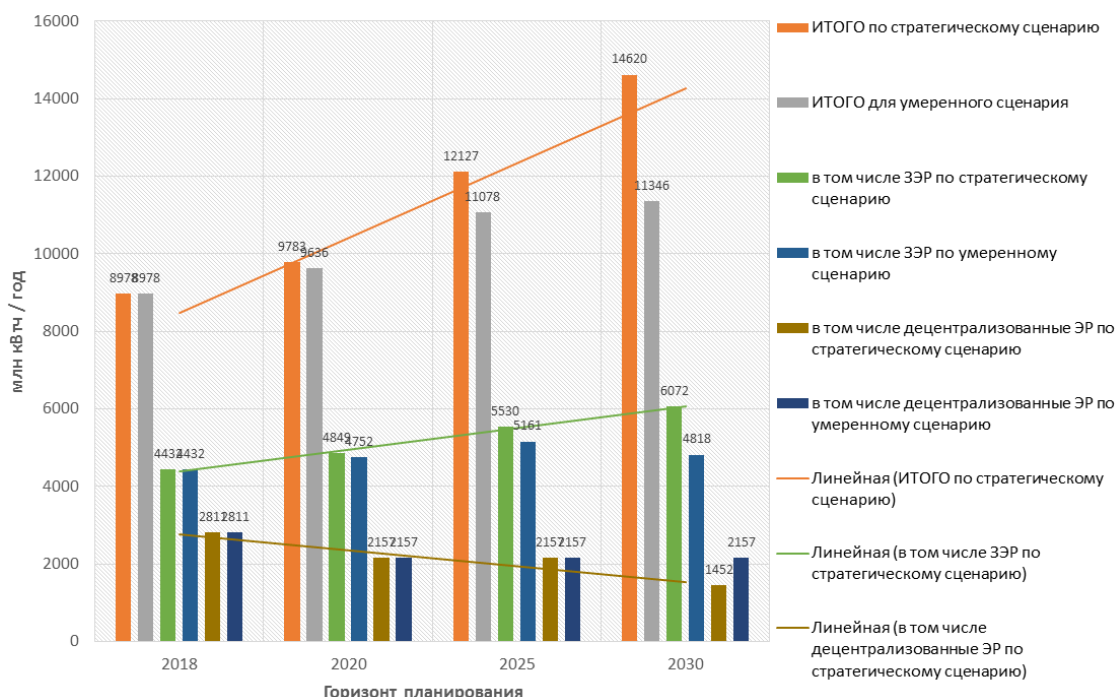


Рис.4 Уровни потребления электроэнергии в республике при двух возможных сценариях

Fig. 4 Levels of electricity consumption in the republic under two possible scenarios

Карантинные меры, вызванные вирусом Covid-19, внесут определенные коррективы в цифры прогнозов развития электроэнергетики Якутии и ЗЭР в том числе. Скорее всего прогноз на 2020 г. не подтвердится даже по умеренному варианту, но к 2025 г. ситуация должна выровняться [21].

Авторами был проведен дополнительный анализ показателей энергопотребления республики по двум сценариям на более долгосрочную перспективу и построены полиномиальные функции. Был применен полином 2-го порядка, так как на линейных графиках (рис. 4) имеется только один экстремум, в связи с чем полиномиальная аппроксимация не требуется. Воспользуемся методом наименьших квадратов, в основе которого лежит минимизация суммы квадратов отклонений функций от подлежащих нахождению переменных. Полученные характеристики и уравнения представлены на рис. 5.

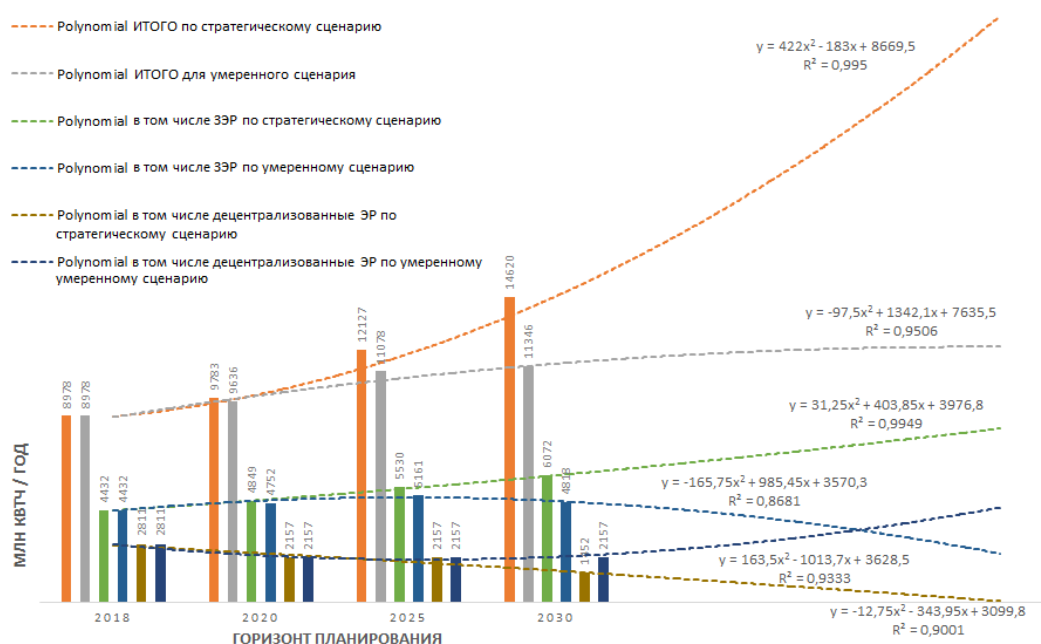


Рис.5 Прогнозируемые уровни потребления электроэнергии в республике, полученные при помощи полиномиального анализа

Fig. 5 Projected levels of electricity consumption in the republic, obtained using a polynomial analysis

Проанализировав полученные результаты, авторами были сделаны следующие выводы: наибольшую достоверность с показателем $R^2=0,995$ показывает полиномиальная характеристика стратегического сценария электропотребления в республике, а наименьшую – умеренный сценарий электропотребления в Западном энергорайоне с показателем $R^2=0,868$. Из этого делаем вывод, что стратегический сценарий является слишком жестким, так как даже при открытии новых предприятий добычи нефти и газа, электропотребление в республики вряд ли к 2035 г. превысит 20 млрд. кВт·ч. Это связано с тем, что в современной структуре электропотребления республики добыча полезных ископаемых занимает лишь 32,2%. В то же время умеренный сценарий более точно предсказывает уровень электропотребления как по всей республике, так и в Западном энергорайоне, где электропотребление продолжит снижаться в связи с постепенным закрытием алмазодобывающих предприятий [22]. Остаются надежды на возобновление работы (приблизительно к 2040 г.) алмазодобывающего рудника «Мир», который был закрыт из-за аварии летом 2017 г. Что же касается децентрализованных энергорайонов, то прогнозы по двукратному снижению электропотребления согласно стратегическому сценарию кажутся нереальными в связи с началом работы в 2018 г. ГДК «Верхне-Мунское» и активными работами ПАО «Полус» и АО «Алмазы Анабара» по добыче золота и алмазов соответственно. При долгосрочном прогнозе умеренного сценария на полиномиальной характеристике электропотребления децентрализованных энергорайонов наблюдается обратное повышение до уровней 2018 г., что можно обосновать планами использования уникальных плавучих атомных теплоэлектростанций для электроснабжения Северных и Арктических территорий [23, 24].

Выводы

Проанализировав текущее состояние электроэнергетического комплекса, и оценив сценарии развития энергетического сектора экономики республики, авторы сделали следующие выводы:

1. Развитие системы электроснабжения Западного энергорайона по принципу кольца с подключением к сетям Объединенной энергосистемы Востока дает широкие возможности по передаче избытка электроэнергии в другие районы страны, либо при необходимости получение от других систем недостающих мощностей.

2. Полезное электропотребление значительно увеличивается в период 2025-2030 гг., среднегодовой темп прироста составит 4,8%, тогда как темп производства электроэнергии в этот период составит 1,1%. В связи с чем, в этот период будет происходить снижение отпуска электроэнергии в ОЭС Востока.

3. Среднегодовой темп прироста производства электроэнергии в целом за период с 2018 г. до 2032 г. составит 1,6%, а полезного потребления – 2,4%. В связи с этим возможно увеличение поставок в республику электроэнергии как из ОЭС Востока, так и ОЭС Сибири.

4. Согласно умеренному сценарию выработка электроэнергии будет расти существенно более низкими темпами в среднем в год 0,4% и достигнет величины 11,6 млрд. кВт·ч.

5. Структура производства электроэнергии изменится: доля ГЭС уменьшится, а доля ТЭС увеличится. Выработка электроэнергии возобновляемыми источниками будет, как и была невелика до 2-3 млн. кВт·ч.

6. Планируется использование плавучих атомных электростанций малой мощности, что позволит покрыть потребности новых проектов в Арктической зоне РФ.

Литература

1. Proskuryakova L., Starodubtseva A., Bianco V. Modelling a household tariff for reducing sectoral cross-subsidies in the Russian power market // *Energy*. 2020. V. 213. No. 118725.

2. Земцов С.П., Кидяева В.М., Баринаева В.А., и др. Экологическая эффективность и устойчивое развитие регионов России за двадцатилетие сырьевого роста // *Экономическая политика*. 2020. Т. 15. № 2. С. 18-47.

3. Proskuryakova L.N., Ermolenko G.V. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies // *Renewable Energy*. 2019. V. 143. P. 1670–1686.

4. Igaliyeva L., Niyazbekova S., Serikova M., et al. Towards environmental security via energy efficiency: A case study // *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2020. V. 7. Is. 4. P. 3488–3499.

5. Gardiner R., Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus. A case of EU regions // *Waste Management*. 2020. V. 114. P. 124–135.

6. Грудистова Е.Г. Занятость в условиях цифровизации общества: региональный аспект // *Проблемы социально-экономического развития Сибири*. 2020. № 3 (41). С. 15–22.

7. Gouveia J.P., Palma P. Harvesting big data from residential building energy performance certificates: Retrofitting and climate change mitigation insights at a regional scale // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. Is. 9. No. 095007.

8. Миндели Л.Э., Акоев М.А., Золотова А.В., и др. Библиометрическая оценка тенденций развития отечественных исследований и модели научного сотрудничества в фундаментальной науке в области энергетики // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 7. С. 664–677.

9. Moshkovich A., Rapoport L.S. Effect of stacking-fault energy on the deformed structures and work hardening of Ag and Ni after scratching during early loading stage // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. V. 29. Is. 11. P. 7231–7238.

10. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Федоров О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей Республики Саха (Якутия) // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 46–55.

11. Бебихов Ю.В., Грачева Е.И., Павлова С.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Эффективность и потенциал сбережения топлива и энергии в северо-восточном регионе России (на примере Республики Саха (Якутия)) // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2020. Т. 12. № 3 (47). С. 14–27.

12. Volotkovskaya Y.A., Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., et al. Analysis of the global energy resource market // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 178. No. 01058.

13. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 2. С. 65–74.

14. Elyakova I.D., Elyakov A.L., Karataeva T.A., et al. Conditions for effective long-term energy supply to the arctic areas of the Republic of Sakha (Yakutia) // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2018. V. 8. Is. 6. P. 361–370.

15. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., др. 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.

16. Gerasimov D.O., Serdyukova E.V., Suslov K.V., et al. Energy hub component models for multi-energy system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1582. Is. 1. No. 012033.

17. Zhang L., Song G., Ma X., et al. Decarbonising residential building energy towards achieving the intended nationally determined contribution at subnational level under uncertainties // *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 272. No. 122760.

18. Nevzorova T. Biogas production in the Russian federation: Current status, potential, and barriers // *Energies*. 2020. V. 13. Is. 14. No. 3620.
19. Шевырëв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // *Горный журнал*. 2019. № 1. С. 66–69.
20. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Расчет удельных норм электропотребления для выемочных участков угольных шахт // *Горный журнал*. 2020. № 4. С. 66–68.
21. Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Fedorov O.V. Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia) // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 753. Is. 8. No. 082033.
22. Волотковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2019. № 3 (78). С. 52–62.
23. Tarasova O.V., Sokolova A.A. Spatial organization of the Chukotka's economy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 302. Is. 1. No. 012113.
24. Handrlica J. Underground repositories, reprocessing facilities and floating nuclear power plants: Liability issues revisited // *Journal of Energy and Natural Resources Law*. 2019. V. 37. Is. 3. P. 263–288.

Авторы публикации

Волотковская Наталья Сергеевна – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: volotkovska_n@mail.ru. Тел: 8(984)1168650.

Семёнов Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: sash-alex@yandex.ru. Тел: 8(914)2950425.

Бибихов Юрий Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства, Политехнический институт (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном. Email: bebikhov.yura@mail.ru. Тел: 8(914)2523159.

Шевчук Владислав Алексеевич – канд. техн. наук, инженер-конструктор Научно-производственного центра «Полюс». Email: shevchukvlal@yandex.ru..

Федоров Олег Васильевич – д-р. техн. наук, проф., профессор кафедры Управления инновационной деятельностью Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева. Email: fov52@mail.ru.

References

1. Proskuryakova L, Starodubtseva A, Bianco V. Modeling a household tariff for reducing sectoral cross-subsidies in the Russian power market. *Energy*. 2020;213:118725.
2. Zemtsov S.P., Kidyaeva V.M., Barinova V.A., Lanshina T.A. Environmental efficiency and sustainable development of the regions of Russia for twenty years of raw materials growth. *Economic policy*. 2020;15(2):18-47.
3. Proskuryakova LN, Ermolenko GV. The future of Russia's renewable energy sector: Trends, scenarios and policies. *Renewable Energy*. 2019;143:1670-1686.
4. Igaliyeva L, Niyazbekova S, Serikova M, et al. Towards environmental security via energy efficiency: A case study. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2020;7(4):3488-3499.
5. Gardiner R, Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus - A case of EU regions. *Waste Management*. 2020;114:124-135.
6. Grudistova EG. Employment in the context of digitalization of society: a regional aspect. *Problems of socio-economic development of Siberia*. 2020;3 (41):15-22.

7. Gouveia JP, Palma P. Harvesting big data from residential building energy performance certificates: Retrofitting and climate change mitigation insights at a regional scale. *Environmental Research Letters*. 2019;14(9):095007.
8. Mindeli LE, Akoev MA, Zolotova AV, et al. Bibliometric assessment of trends in the development of domestic research and models of scientific cooperation in fundamental science in the field of energy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2020;90(7):664–677.
9. Moshkovich A, Rapoport LS. Effect of stacking-fault energy on the deformed structures and work hardening of Ag and Ni after scratching during early loading stage. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020;29(11):7231-7238.
10. Volotkovskaya NS, Semyonov AS, Fedorov OV. Analysis of the structure and technical condition of the western electrical networks of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2018;20(11)-12:46–55.
11. Bebikhov YuV, Gracheva EI, Pavlova SN, et al. Efficiency and potential for saving fuel and energy in the north-eastern region of Russia (on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)). *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2020;12:3 (47):14–27.
12. Volotkovskaya YA, Volotkovskaya NS, Semenov AS, et al. Analysis of the global energy resource market. *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01058.
13. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and assessment of energy savings in intra-plant power supply systems. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(2):65–74.
14. Elyakova ID, Elyakov AL, Karataeva TA, et al. Conditions for effective long-term energy supply to the arctic areas of the Republic of Sakha (Yakutia). *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2018;8(6):361-370.
15. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply with a free-piston engine based on a synchronous reciprocating electric machine with permanent magnets. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2020;22(1):38–48.
16. Gerasimov DO, Serdyukova EV, Suslov KV, et al. Energy hub component models for multi-energy system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1582(1):012033.
17. Zhang L, Song G, Ma X, et al. Decarbonising residential building energy towards achieving the intended nationally determined contribution at subnational level under uncertainties. *Journal of Cleaner Production*. 2020;272:122760.
18. Nevzorova T. Biogas production in the Russian federation: Current status, potential, and barriers. *Energies*. 2020;13(14):3620.
19. Shevyrev YuV, Shevyreva NYu. Improvement of the voltage shape in power supply systems of enterprises of the mineral resource complex with an active rectifier. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66–69.
20. Kubrin SS, Reshetnyak SN. Calculation of specific norms of power consumption for mining areas of coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;4:66–68.
21. Volotkovskaya NS, Semenov AS, Fedorov OV. *Feasibility of Energy Sector Development and Optimization Program of the Republic of Sakha (Yakutia)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(8):082033.
22. Volotkovskaya NS, Semenov AS, Fedorov OV. Energy efficiency and energy saving in power supply systems of mining enterprises. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoy*. 2019;3 (78):52–62.
23. Tarasova OV, Sokolova AA. *Spatial organization of the Chukotka's economy*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;302(1):012113.
24. Handrlica J. Underground repositories, reprocessing facilities and floating nuclear power plants: Liability issues revisited. *Journal of Energy and Natural Resources Law*. 2019;37(3):263–288.

Authors of the publication

Natalia S. Volotkovskaya – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: volotkovska_n@mail.ru.

Alexander S. Semenov – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: sash-alex@yandex.ru.

Yuriy V. Bebikhov – NEFU n.a. M.K. Ammosov, Polytechnic Institute (branch) in Mirny, Mirny, Sakha, Russia. Email: bebikhov.yura@mail.ru.

Vladislav A. Shevchuk – JSC Research and Production Center Polyus, Tomsk, Russia. Email: shevchukvlal@yandex.ru.

Oleg V. Fedorov – NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. Email: fov52@mail.ru.

Получено

Отредактировано

Принято

МОДИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РОТОРА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Т.И. Петров

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

tobac15@mail.ru

Резюме: Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) находят все более широкое применение в разнообразных сферах использования электроприводов промышленных предприятий. Для каждого применения электропривода необходимо соблюдать конкретные технические требования, такие как, максимальный крутящий момент, допустимая температура нагрева электродвигателя и выполнение требуемых условий по прочностным характеристикам ротора и статора.

У СДПМ есть ряд преимуществ перед другими типами двигателей. Асинхронные двигатели выработали ресурс рациональной энергоэффективности, а синхронные двигатели более энергоэффективны без доработок. СДПМ имеют меньшие весогабаритные параметры, что позволяет использовать их в более широкой области применения, например, в бытовой технике, роботах и многих других приводах.

ЦЕЛЬ. Целью является разработка методики топологической комплексной оптимизации конструкции двигателя, базирующийся на генетическом алгоритме.

МЕТОДЫ. Метод генетического алгоритма более точен, чем традиционные аналитические методы, используемые при анализе машин переменного тока, и занимает меньше времени, чем обычная процедура проектирования методом проб и ошибок, основанная на методе конечных элементов. Главный критерий оптимизации - это увеличение крутящего момента при сохранении массы самого дорогого материала (постоянных магнитов), а важным моментом будет проверка полученной конструкции на термические и прочностные характеристики. Эта особенность важна для изготовления спроектированного двигателя на производстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Программа на языке Python, которая позволила провести комплексную топологическую оптимизацию для рассматриваемого двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлена топологическая оптимизация, основанная на методе модификации конструкции ротора с использованием генетического алгоритма с дополнениями, необходимыми для корректной работы с синхронными двигателями.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, генетический алгоритм, конструкция ротора, постоянные магниты, синхронный двигатель.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90134.

Для цитирования: Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 70-79 doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-70-79.

MODIFICATION OF THE GENETIC ALGORITHM FOR COMPREHENSIVE TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE SYNCHRONOUS MOTORS ROTOR

TI. Petrov

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

tobac15@mail.ru

Abstract: Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in various fields of application of electric drives of industrial enterprises. For each application of the electric drive, it is necessary to accept technical requirements, such as the maximum torque of the electric motor and the fulfillment of the required conditions for the strength characteristics of the rotor

and stator.

PMSM has a number of advantages over other types of engines. Asynchronous motors have developed resource rational energy efficiency, while synchronous motors are more energy efficient without modifications. PMSM have smaller weight and size parameters, which allows them to be used in a wider field of application, for example, in household appliances, robots and many other drives.

TARGET. The aim is to develop a methodology for topological complex optimization of the engine design, based on a genetic algorithm.

METHODS. The genetic algorithm is more accurate than traditional analytical methods, the method used in the analysis of AC machines, takes less time than the usual trial and error design procedure based on the finite element method. The main optimization criterion is an increase in torque while maintaining the mass of the most expensive material (permanent magnets). This feature is important for the manufacture of a designed engine in production.

RESULTS. A program has been written in Python, which made it possible to carry out a comprehensive topological optimization for the engine under consideration.

CONCLUSION. Topological optimization based on the method of modifying the rotor design using a genetic algorithm with the additions necessary for correct operation with synchronous motors is presented.

Keywords: topological optimization, genetic algorithm, rotor design, permanent magnets, synchronous motor.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90134.

For citation: Petrov TI. Modification of the genetic algorithm for comprehensive topological optimization of the synchronous motors rotor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):70-79. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-70-79.

Введение

Приводы синхронных электрических машин являются подсистемой множества промышленных, транспортных и бытовых систем, для примера это - электрические / гибридные электромобили, ветряные генераторы, бытовые приборы, самолеты, насосы, вентиляторы и т. д. В некоторых случаях производительность, размер, стоимость и эффективность этой подсистемы имеют наиболее важное значение для работоспособности или конкурентоспособности двигателя. Часто разработчику системы необходимо понять, является ли выбранная подсистема «оптимальной» для рассматриваемого приложения [1]. Компромисс между различными показателями производительности подсистемы электрических машин также представляет большой интерес для разработчика системы. Точно так же необходимо понять, будет ли улучшение определенного материала для применения в электрических машинах представлять значительный интерес для определенных приложений. Критические материалы (с точки зрения стоимости, доступности и т.д.) необходимо заменить более доступными, если существует угроза дефицита поставок. Для примера можно привести следующий случай, когда несколько лет назад было большой проблемой использование постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов, вследствие проблем с поставкой из Китая, основного поставщика.

Для всех этих сценариев требуется автоматизированный инструмент проектирования, который может оптимизировать конструкцию в соответствии с требованиями конечного пользователя и помочь определить правильную комбинацию топологии, материалов, геометрии и электрической нагрузки для достижения нескольких целей [2]. К желаемым свойствам такого средства можно отнести:

1. Применимо к широкому спектру сценариев проектирования и задач анализа конструкции.
2. Требуется минимум интуиции или суждения со стороны конечного пользователя.
3. Точный, т.е. тот, который дает истинный оптимум и, следовательно, основан на точной модели машины.
4. Возвращает результаты за реалистичное время, которое конечный пользователь может позволить себе подождать.
5. Использует вычислительные ресурсы, которые могут позволить себе большинство пользователей.

6. Гибкость: возможность расширения за пределы существующих геометрий, материалов, методов анализа или определений проблем.

Первая задача автоматизации проектирования - понять требования конечного пользователя и на их основе сформулировать задачу оптимизации. Конечный пользователь может решить проблему проектирования множеством различных способов. До сих пор не было предпринято попыток классификации проблем или перечисления различных возможных способов их определения [3]. Вторая проблема заключается в понимании того, как можно использовать общую структуру моделей и методов для решения различных классов определений проблем, обеспечивая при этом точность моделей и быструю сходимость к оптимальным значениям.

Литературный обзор

Принимая во внимание тенденцию к повышению энергоэффективности, использование более экономичных СДПМ (рис. 1) становится все более актуальным [4,5]. Однако у СДПМ есть и очевидные недостатки, главный из которых - высокая базовая стоимость двигателя. Постоянные магниты (ПМ) (неодим, кобальт, никель и др.) - дорогостоящий элемент конструкции двигателя. В настоящее время развивается промышленное производство постоянных магнитов (ПМ) с высокими энергетическими характеристиками [6,7]. Такие магниты позволяют создавать большой магнитный поток в малых объемах, что позволяет значительно увеличить максимальную мощность электрических машин [8]. Стоимость ПМ по отношению к стоимости активных материалов для СДПМ составляет около 80%, и поэтому становится очевидным, что необходимо уменьшить объем ПМ [9] и, если возможно, повысить энергоэффективность двигателя. И один из вариантов уменьшения объема ПМ – более оптимальное расположение магнитов в теле ротора, которое можно определить в процессе топологической комплексной оптимизации конструкции двигателя.

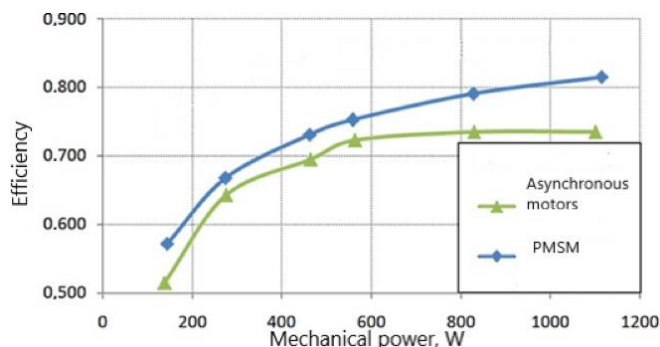


Рис. 1. Энергоэффективность асинхронных двигателей и СДПМ (1 кВт)

Fig. 1. Energy efficiency of asynchronous motors and PMSM (1 kW)

Распределение материалов (топология) в корпусе ротора СДПМ (постоянные магниты разной направленности, воздух, железо) определяет характеристики электрической машины. Первоначально топологическая оптимизация проводилась методом конечных элементов для уменьшения массы и улучшения прочностных характеристик конструкций [10].

Разработанная методика и программа дают возможность использовать оптимизацию не только для повышения прочностных характеристик, но и для изменения основных характеристик двигателя (увеличение вращающего момента, уменьшение температуры и т.д.) при заданном весе и габаритах [11].

Алгоритм пошаговой топологической оптимизации роторов с учетом электромагнитных, тепловых процессов и прочностного анализа позволяет проектировать прототипы роторов СДПМ с высокими энергетическими характеристиками для подготовки эскизной и рабочей конструкторской документации, но на данный момент отсутствуют работы по топологической комплексной оптимизации конструкции синхронных двигателей с ПМ [12]. Эта идея реализована за счет топологической оптимизации, то есть в нашем случае мы переходим от стандартных положений магнита к V- или W-образным магнитам. Точное расположение магнитов определяется с помощью генетического алгоритма (ГА).

Методы. Метод генетического алгоритма

Модель электрической машины является нелинейной, сложной и часто требует численных методов оценки. Кроме того, оценка производной по параметрам проекта может

стать чрезмерной, если количество переменных проекта велико или оно не определено для дискретных входных данных.

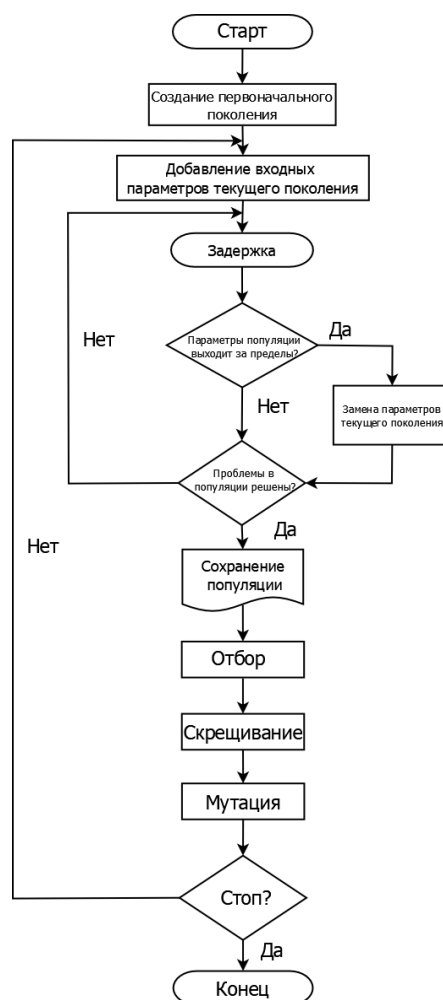


Рис. 2. Стандартный алгоритм ГА

Fig. 2. Standard GA algorithm

В таких случаях поиск на основе градиента или поиск по сетке становится невозможным из-за сложности проблемы. Следовательно, используются определенные случайные, но умные алгоритмы поиска, такие как генетические алгоритмы (ГА), дифференциальная эволюция, контролируемый случайный поиск и оптимизация роя частиц.

Идея использования компьютерных мощностей для оптимизации электрических машин возникла более 60 лет назад. В контексте современных компьютеров и развития методов стохастической оптимизации использование ГА для оптимизации электромагнитных устройств было предложено Улером и др. в 1994 г. С тех пор этот метод применялся к нескольким различным сценариям проектирования и развивался с точки зрения принятых методов и моделей [13], а также с точки зрения сложности целей проектирования [14].

Очень мощной особенностью использования методов поиска на основе популяции является гибкость при распределении вычислений. Оценка пригодности индивидуумов в каждом наборе популяций является независимым вычислением и может быть назначена любому компьютеру в сети. Это не обязательно требует вычислительной среды с высокой пропускной способностью или вычислительной среды. Также не критична надежность сети и доступность узлов. Это демонстрируется блок-схемой на рис. 2, на которой показана реализация сервера оптимизации на базе генетического алгоритма, адаптированного для этой работы.

В случае, если количество целей равно одному ($M = 1$), оптимизатор возвращает один вектор параметров, который максимизирует / минимизирует целевую функцию. Если проблема имеет более одной цели для оптимизации ($M > 1$), оптимизатор возвращает не доминируемый, а оптимальный по Парето набор решений. Оптимизация с несколькими

целями позволяет разработчику понять компромиссы между различными целями и сделать выбор на основе этого набора, а не назначать функцию взвешивания, не зная компромиссов. Обратите внимание, что пределы границ параметров обрабатываются отдельно от ограничений-неравенств, поскольку их выполнение не требует какой-либо оценки функции, поскольку они легко удовлетворяются с помощью линейного отображения.

Хотя аналитические подходы топологической оптимизации на базе ГА требуют меньшего объема вычислений, они обладают следующими недостатками:

1. Модель основана на приближении поля и не может быть подтверждена как правильная для широкого диапазона входных параметров, что ставит под угрозу точность результатов.

2. Модель не распространяется на все типы геометрий, и моделирование необходимо повторять для каждого выбора геометрии статора / ротора.

3. Некоторые представляющие интерес эффекты, такие как зубчатый момент, пульсация крутящего момента, нелегко смоделировать с помощью этого типа анализа.

4. Средняя модель магнита не дает точного предсказания размагничивания, поскольку частичное размагничивание требует знания поля внутри магнита.

Некоторые недостатки можно исправить дальнейшим усовершенствованием метода, специально предназначенное для исследования крутящего момента, магнитного потока и потерь в сердечнике в электрической машине. Эта модель извлекает данные трехфазного потока из небольшого количества магнитостатических симуляций для электрического угла поворота на 60° и собирает форму волны электрического угла на 360° потоков и магнитных полей с использованием преобразования «пространство-время». Крутящий момент вычисляется из магнитного потока после выделения значимых гармоник в форме волны магнитного потока. Это означает, что пользователь может контролировать, сколько значимых гармоник следует учитывать при расчетах крутящего момента и потерь в сердечнике. Этот метод был дополнительно усовершенствован за счет отдельного учета зубцового момента.

Конструкция ротора представлена в виде последовательности чисел, где каждая цифра представляет определенный материал (воздух, сталь, магниты с разным направлением коэрцитивной силы и т.д.).

Например, на рисунке 3 показана часть ротора с поверхностным расположением магнитов, где цифра 3 - ПМ, 1 - сталь, 0 - воздух.

Topology

1	3	3	3	1
1	1	1	1	1
1	0	0	0	1

Ind1=1333111111000

Рис. 3. Пример топологии ротора СДПМ

Fig. 3. An example of the topology of the PMSM rotor

Эту последовательность можно рассматривать как хромосому, и в результате ГА - это процесс поиска лучшей хромосомы для конкретной целевой функции, в нашем случае определения крутящего момента.

Для реализации ГА необходимо использовать следующую последовательность методов:

1. Случайный выбор первых хромосом (родителей). Число может отличаться, но обязательным условием является четность. Например, представлены два родителя.

2. Происходит скрещивание двух хромосом (родителей) друг с другом и получение еще двух хромосом (детей).

3. По рассчитанному значению крутящего момента (М) для всех 4 хромосом выбираем два наибольших значения. Эти 2 хромосомы становятся следующими родителями.

4. ГА работает до того случая, когда будут достигнуты определенные результаты выполнения работ (достижение определенного значения целевой функции, количество циклов ГА)

Пример ГА показан на рисунке 4. В этом случае хромосомы для следующего поколения были родительским № 2 и дочерним № 1.

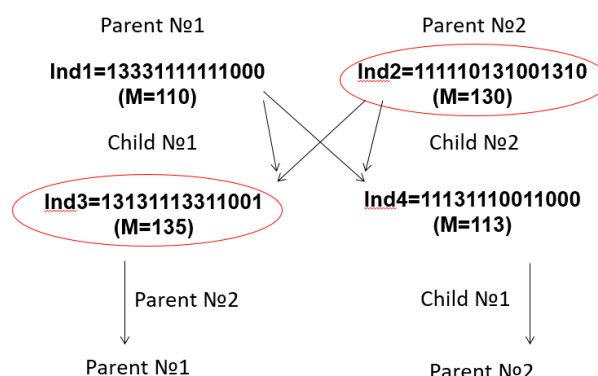


Рис. 4. Пример одной итерации генетического алгоритма

Fig. 4. An example of one iteration of a genetic algorithm

Особенности генетического алгоритма топологической оптимизации СДПМ

Теперь обратимся к особенностям ГА для топологической оптимизации СДПМ. Без учета следующих положений ГА становится бесполезным для двигателей.

Наиболее очевидным дополнением является четкий фактор завершения ГА - наибольший крутящий момент обнаруживается на одной хромосоме, а не на популяции или паре хромосом.

Вторая добавка - это определенное количество определенного материала в каждой хромосоме, а именно ПМ, это необходимо для уменьшения объема дорогостоящего материала.

Также важно отметить, что целевая функция для определения крутящего момента не является аналитической; ее решение требует использования метода конечных элементов. Для решения этой проблемы используется специальное программное обеспечение Elcut.

Остальные функции будут выражены в виде подклассов описанного выше алгоритма.

1.1. Если родителей больше двух, то необходимо осуществить подбор наиболее подходящих хромосом для дальнейшей трансформации.

Выбор может быть реализован в виде случайного выбора или выбора наиболее подходящих хромосом по значению целевой функции. Чтобы лучшая хромосома постоянно попадала в пару для спаривания, можно ввести метод элитарности. Однако следует учитывать, что элитарность может привести к попаданию в область локального максимума, а это приведет к ошибочному результату. Чтобы решить эту проблему, необходимо ввести условие определенного количества повторений элитной хромосомы.

2.1. Спаривание должно осуществляться методом разделения по двум точкам, чтобы добиться наибольшего разнообразия хромосом.

Особенности термических и прочностных расчетов заключаются в том, что в хромосомах гены с материальными магнитами не участвуют в изменениях. Идея состоит в том, чтобы обеспечить необходимую температуру двигателя через отверстия в корпусе ротора, то есть путем замены материала стали на воздух. А для расчетов на прочность алгоритм обратный, необходимо увеличить прочность станка, заменив материал воздух на сталь. Поэтому важно установить правильное максимальное значение целевой функции.

В качестве примера мы используем СДПМ с поверхностным расположением магнитов (рис.4).



Рис. 5. Ротор СДПМ с поверхностными магнитами

Fig. 5. PMSM rotor with surface magnets

Результаты

Для реализации комплексной топологической оптимизации была реализована программа на языке Python.

В качестве примера приведем последовательность расчета для оптимизации вращающего момента (электромагнитные расчеты).

1. Создаем начальную популяцию из 4 хромосом случайным образом (рандомайзер). На этом этапе уже необходимо введение условия определенного количества материала, например, не менее 5 ячеек стали (материал 0), где хромосома следующего вида - [0, 1, 4, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 4].

2. Расчет целевой функции в программе Elcut (рис. 5).

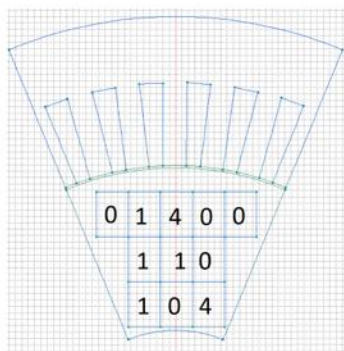


Рис. 6. Сектор ротора для расчета в Elcut

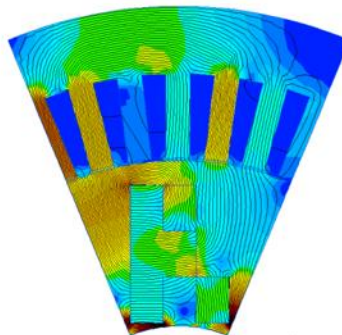


Fig. 6. Rotor sector for calculation in Elcut

3. Предыдущий шаг необходимо проделать три раза для трех различных геометрий, связано это с тем, что для адекватной оценки вращающего момента необходимо рассчитывать значение среднеквадратичного момента. Три геометрии должны отличаться расположением фаз в пазах статора с вращением 15 градусов.

4. Выбор особей для скрещивания необходим для вариативности возможных скрещиваний и значений целевой функции, в нашем случае использован выбор наиболее подходящей половины, а элитарность введена посредством обязательного выбора хромосомы с наибольшим вращающим моментом в пару для скрещивания.

5. Скрещивание заключается в создании двух хромосом (ребенок 1 и 2) на базе двух хромосом родители, в методике используется скрещивание по одной точке.

6. Мутация (Мутация любой хромосомы, кроме элитарной)

7. Создание следующего поколения.

В результате получаем excel файл со следующими строчками:

```
{'Individuals': [[0, 1, 4, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [0, 0, 4, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 0, 0, 0, 3, 1, 1, 0, 1, 0, 4], [4, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 4]], 'Fitness': [14.730919862656235, 62.313722405261586, 201.16742612394617, 430.0058139141842]}
```

Где Individuals – хромосомы, Fitness – значения вращающего момента.

В ходе реализации комплексной топологической оптимизации получена новая конструкция ротора СДПМ (рис. 6). Разработанный двигатель имеет в своем составе на 9,7

% меньший объем ПМ, и по теоретическим расчетам должен иметь более высокий вращающий момент (увеличение на 3-5%) (рис 7.).

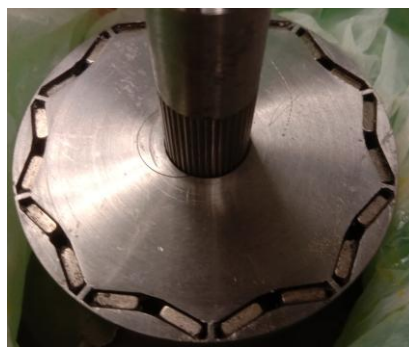


Рис. 7. Ротор СДПМ после изменения конструкции после топологической оптимизации

Fig. 7. PMSM rotor after design change after topological optimization

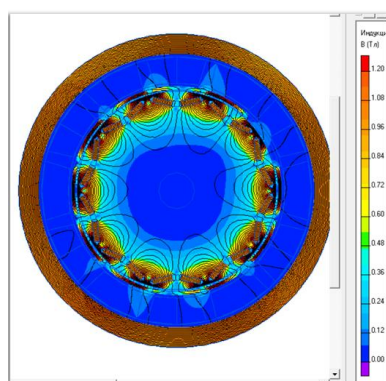


Рис. 8. Магнитное поле модернизированного СДПМ

Fig. 8. The magnetic field of the modernized PMSM

Выводы

В идеальном мире «автоматизированный» инструмент проектирования - это инструмент, способный переводить пользователя от требований дизайна к набору Парето без какого-либо понимания пользователем процесса проектирования. Аналогичным образом исследователь, который ищет альтернативы стандартным технологиям (топологии, материалам или технологиям производства) с целью превзойти то, что достижимо с помощью стандартизованных технологий, должен иметь возможность проводить объективное сравнение существующих и новых технологий с помощью инструмента автоматизированного проектирования.

Чтобы оптимизировать конструкцию СДПМ, можно использовать генетический алгоритм, который имеет необходимые преимущества перед другими методами поиска. Поскольку ГА изначально создавался для решения задач, связанных с улучшением характеристик группы лиц, и перед нами стоит задача получения наиболее оптимального расположения материалов в одном конкретном случае, ГА был модернизирован для задач топологической оптимизации СДПМ [15].

Для перехода от этого довольно абстрактного определения такого инструмента проектирования к программной реализации необходимо модернизировать генетический алгоритм, что и было продемонстрировано в данной работе. Этот инструмент разработан в среде Python и используется для исследования топологий роторов СДПМ.

Литература

1. Мягков Л.Л., Сивачев С.М., Стрижов Е.Е., и др. Топологическая оптимизация поршня высокофорсированного дизеля // Двигателестроение. 2018. № 2. С. 3–10.
2. Lee J., Kikuchi N., «Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution,» IEEE Trans. Magn. 2010. V.46. no.10. pp. 3790–3794.
3. Petrov T.I., Safin A.R. «Modification of the synchronous motor model for topological optimization» .(2020) E3S Web of Conferences. 2020. 178, paper № 01016.

4. Gracheva E.I., Naumov O.V., Gorlov A.N. «Modelling Characteristics of Reliability Low-Voltage Switching Devices on the Basis of Random Checks on the Example of Contactors» (2019) Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, article № 8947595, pp. 641-643.
5. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2019. № 4(40). С. 77-85.
6. Караулов В. Н., Сахаров М. В. Методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки // Вестник ИГЭУ. 2019. №2.
7. Хитрин А.М., Ерофеева М.М., Туктамышев В.Р., и др. Топологическая оптимизация корпусных деталей вертолетного редуктора // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2018. №53.
8. Ishikawa T., Nakayama K., Kurita N., and Dawson F. P. «Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure». IEEE Trans. on Magnetics. 2014. V. 50. no. 2. paper no. 7015704.
9. Takahashi N., Yamada T., and Miyagi D. «Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method», IEEE Trans. Magn. 2010. V.46, no.8. pp. 3149–3152.
10. Кишов Е.А., Комаров В.А. Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. №1.
11. Dong L., Han X., Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. Vol. 29. Iss. 4.
12. Khasanov S.R., Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I., et al. «Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate» E3S Web Conf., 178 (2020) 01051.
13. Morimoto S., Kawamoto K., Sanada M., et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting, 2011. V. 4. P. 2637-2644.
14. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №4 (51).
15. Dadabaev S.T., Islomovna T.M., Saidulloevna M.D. Modelling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network // European Journal of Electrical Engineering, 2020. T. 22. № 1. С. 23-28.

Авторы публикации

Петров Тимур Игоревич – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Myagkov LL, Sivachev SM, Strizhov EE, et.al. Topological optimization of a high-performance diesel piston. *Dvigatelsestroyeniye*. 2018;2;3–10.
2. Lee J, Kikuchi N. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution. *IEEE Trans. Magn*. 2010;46;10; 3790–3794.
3. Petrov TI, Safin AR. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. *E3S Web of Conferences*. 2020;178; paper № 01016.
4. Gracheva EI., Naumov OV, Gorlov AN. Modelling Characteristics of Reliability Low-Voltage Switching Devices on the Basis of Random Checks on the Example of Contactors. *Proceedings. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*. 2019;8947595;641-643.
5. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et.al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm. *Vestnik KSPEU*. 2019;4(40);77-85.
6. Karaulov VN, Sakharov MV. Methods of designing a reversed motor with permanent winch drive magnets. *Vestnik IGEU*. 2019;2.
7. Khitrin AM., Erofeeva MM., Tuktamyshev VR, et.al. Topological optimization of hull components of a helicopter gearbox. *Vestnik PNIPU. Aerospace Engineering*. 2018;53.

8. Ishikawa T, Nakayama K, Kurita N, et.al. Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure. *IEEE Trans. on Magnetics*. 2014;50;2; 7015704.
9. Takahashi N, Yamada T, Miyagi D. Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method. *IEEE Trans. Magn.* 2010;46;8;3149-3152.
10. Kishov EA, Komarov VA. Topological optimization of power structures by convex linearization. *Vestnik Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*. 2018;1
11. Dong L, Han X, Hua L. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29;4.
12. Khasanov SR, Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI., et.al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. *E3S Web Conf.* 2020;178;01051.
13. Morimoto S, Kawamoto K, Sanada M, et.al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame. *Proc. 2001 IEEE IAS Annual Meeting*. 2011;4;2637-2644.
14. Bashin KA, Torsunov RA, Semenov SV. Methods of topological optimization of structures used in the aerospace industry. *Bulletin of the PNRPU. Aerospace engineering*. 2017;4;51
15. Dadabaev ST, Islomovna TM, Saidulloevna MD. Modelling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. *European Journal of Electrical Engineering*. 2020;22;1;23-28.

Authors of the publication

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено	19.03.2021 г.
Отредактировано	01.04.2021 г.
Принято	13.04.2021 г.



АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Романова¹, С.В. Хромов¹, К.В. Суслов²

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Резюме: ЦЕЛЬ. Основной целью работы является комплексное исследование внешних воздействий, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Акцентировано внимание на оценке эксплуатационной надёжности электродвигателей, систематизацию условий их эксплуатации, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов. Среди указанных факторов, подлежащих детальному анализу, выделим следующие: несимметрия напряжений и её длительность, нагрузка электродвигателя, температура окружающей среды. В связи с этим, становится очевидным, задача повышения эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей зависит от качественного исследования количественных значений внешних воздействующих факторов в различных режимах работы электродвигателей. МЕТОДЫ. Инструментом реализации поставленной задачи является наглядное и эффективное средство имитационного моделирования Simulink интерактивной среды программирования Matlab. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АИР160S8 с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин. Моделирование физических процессов исследуемого электродвигателя производилось путём изменения показателей: коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}), нагрузки на валу электродвигателя (K_z), температуры окружающей среды ($t_{окр}$), длительности несимметрии напряжений по обратной последовательности (T). На основании полученных результатов моделирования построены группы плоскостей исследуемых величин. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Комплекс исследований, выполненный с использованием пакета программ Matlab, позволил оценить границы допустимых значений внешних факторов, выявить область допустимой работы асинхронных электродвигателей. Проведен анализ и обсуждение полученных результатов исследования, предложены мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности асинхронных электродвигателей.

Ключевые слова: имитационное моделирование в среде Matlab/Simulink; асинхронный электродвигатель; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

Для цитирования: 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.

ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS AFFECTING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

V.V. Romanova¹, S.V. Khromov¹, K.V. Suslov²

¹Trans-Baikal State University, Chita, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Abstract: *THE PURPOSE.* The main purpose of the work is a comprehensive study of external influences that affect the operational reliability of low-voltage asynchronous motors. Attention is focused on the evaluation of the operational reliability of electric motors, the systematization of their operating conditions, with the simultaneous impact of a group of operational factors. Among these factors that are subject to detailed analysis, we will highlight the following: the asymmetry of the stress and its duration, loading of the motor, the temperature of the environment. In this regard, it becomes obvious that the task of improving the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors depends on a qualitative study of the quantitative values of external influencing factors in various operating modes of electric motors. *METHODS.* The tool for implementing this task is a visual and effective simulation tool Simulink interactive programming environment Matlab. *RESULTS.* The research was performed on an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor AIR160S8 with $P_H = 7,5$ kW, rated speed $n = 1500$ rpm. The physical processes of the electric motor under study were modeled by changing the following parameters: the coefficient of stress asymmetry in the reverse sequence (K_{2U}), the load on the motor shaft (K_z), the ambient temperature (t_{ocr}), and the duration of stress asymmetry in the reverse sequence (T). Based on the obtained simulation results, groups of planes of the studied quantities are constructed. *CONCLUSION.* A set of studies performed using the Matlab software package allowed us to estimate the limits of acceptable values of external factors and identify the area of acceptable operation of asynchronous motors. The analysis and discussion of the research results were carried out, and measures were proposed to improve the operational reliability of asynchronous electric motors.

Keywords: *simulation in the Matlab/Simulink environment; asynchronous electric motor; operational reliability of an asynchronous electric motor.*

For citation: 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.

Введение

Под надёжностью электрической машины понимают способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определённых режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1, 2]. Следует отметить, эффективность и надёжность функционирования асинхронных электродвигателей (АД) зависит не только от качества их проектирования и изготовления, но и от условий эксплуатации. В условиях реальной работы электродвигателей, в зависимости от различных факторов, имеет место значительное отклонение от номинальных режимов эксплуатации. Как показывают исследования и многолетний опыт эксплуатации [3-9], на срок службы электродвигателей оказывают влияние климатические, электромеханические факторы внешней среды, более 50% электродвигателей работают в условиях, параметры которых значительно отличаются от нормированных по ГОСТ Р 51137-98 «Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики», ГОСТ IEC 60034-1-2014 «Машины электрические вращающиеся. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики».

Проведенный анализ работ [10-16] по исследованию работоспособности и качеству функционирования АД в различных режимах его работы, при разнообразных внешних воздействиях показывает, что в процессе эксплуатации на срок службы АД значительное влияние оказывают: качество питающего напряжения (более 60% отказов), вибрация, температура и влажность окружающего воздуха (более 20% отказов), загрузка электродвигателя.

Среди указанных эксплуатационных факторов выделим следующие: несимметрия напряжений и её длительность, загрузка АД, температура окружающей среды. Перечисленные факторы определяют уровень эксплуатационной надёжности АД, но только в совокупности, так как по статистике отказов [17-20] видно, что выход из строя электродвигателей чаще всего связан с несколькими факторами. Именно поэтому, при оценке эксплуатационной надёжности необходимо учитывать совместное влияние неблагоприятных факторов, что позволит более точно спрогнозировать реальный срок службы электродвигателей, тем самым обеспечить необходимый уровень надёжности АД.

Основной целью работы является систематизация условий эксплуатации АД, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов.

Реализация предлагаемого подхода заключается в многофакторном анализе параметров внешних воздействий, влияющих на надёжность электродвигательной нагрузки. Концепция системного подхода, позволяет решать задачи обеспечения безопасного и эффективного функционирования АД в широком диапазоне внешних воздействий.

Материалы и методы исследования

Основной задачей исследования является количественная оценка внешних воздействующих факторов в различных режимах работы АД с короткозамкнутым ротором на виртуальной модели, реализованной в наглядном и эффективном средстве имитационного моделирования *Simulink* интерактивной среды программирования *Matlab* [21-26], характеризующих длительную работу АД.

Схема моделирования для исследования режимов работы АД с короткозамкнутым ротором, сформированная средствами имитационного моделирования в среде *Matlab/Simulink*, представлена на (рис.1).

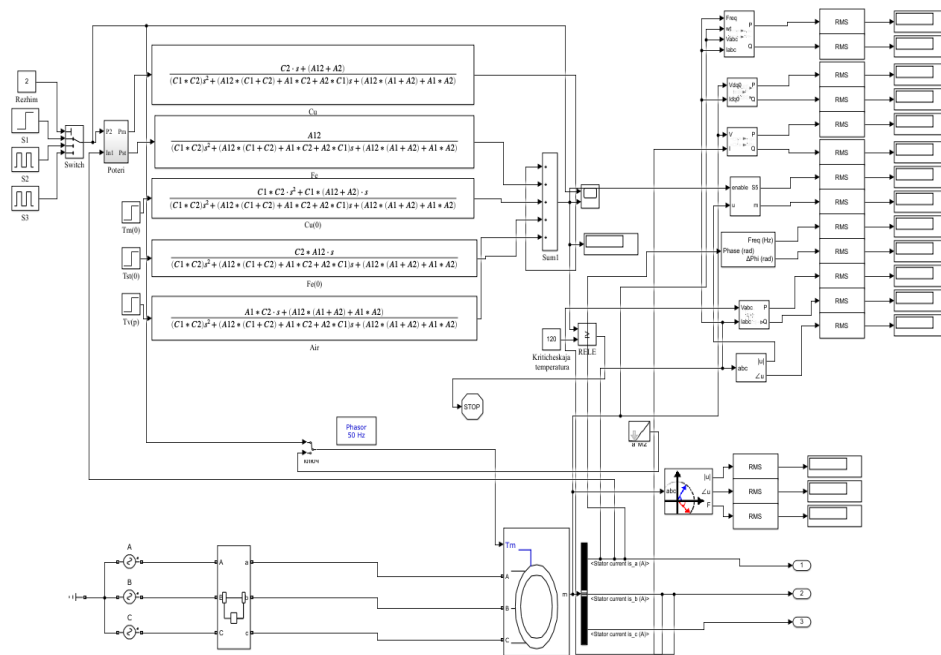


Рис. 1. Схема моделирования, реализованная в среде *Matlab/Simulink*

Fig. 1. Simulation scheme implemented in the *Matlab/Simulink* environment

Разработанная модель позволяет визуально моделировать физические процессы, происходящие в АД, исследовать его работоспособность и качество функционирования в различных режимах работы, при разнообразных внешних воздействиях. Изменяя начальные условия и параметры протекания процессов возможно наблюдать изменения в поведении модели АД разных серий и мощностей.

Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АИР160S8 с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин [27].

Общепромышленные асинхронные электродвигатели АИР160S8 изготовлены для следующих условий эксплуатации:

- климатическое исполнение У;
- категория размещения – 2,3;
- режим работы - продолжительный, S1;
- допустимая температура окружающего воздуха от 40°C до -45°C ;
- класс изоляции Е, допустимая температура обмоток АД 120°C ;
- степень защиты - IP54, 55 (содержание нетокопроводящей пыли в воздухе до 100 мг/м^3 , двигатель защищен от брызг воды с любого направления).

В результате статистического анализа временных диаграмм изменения величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}), основанного на экспериментальных исследованиях показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в распределительных сетях 0,4 кВ [28-30], установлено, что наиболее вероятными величинами длительности непрерывной несимметрии напряжений являются величины находящиеся в интервале 5 -15 минут.

Моделирование физических процессов исследуемого АД производилось путём изменения показателей:

- величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 5 % с шагом в 1 %;
- величина нагрузки на валу электродвигателя (K_z) изменялась от 0 до 120 % с шагом 20 % при различных значениях K_{2U} ;
- величина температуры окружающей среды ($t_{окр}$) изменялась от 40°C до - 40° С с шагом 10° С;
- величина длительности несимметрии напряжений по обратной последовательности (Т) – от 0 до 15 минут с шагом в 5 минут.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием разработанной компьютерной модели получены данные комплексного влияния функционально не связанных параметров, на основании которых построены аналитические зависимости (рис. 2-5), характеризующие связь внешних факторов, определяющие уровень эксплуатационной надёжности АД.

На основании полученных результатов компьютерного моделирования построены группы плоскостей, позволяющие визуально оценить границы допустимых значений внешних факторов.

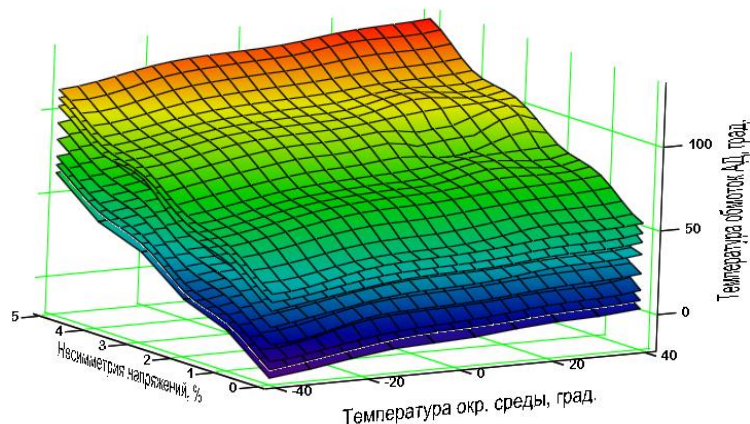


Рис.2. Зависимость температуры обмоток АД от внешних факторов при различных постоянных коэффициентах загрузки

Fig. 2. Dependence of the temperature of the AD windings on external factors at various constant load coefficients

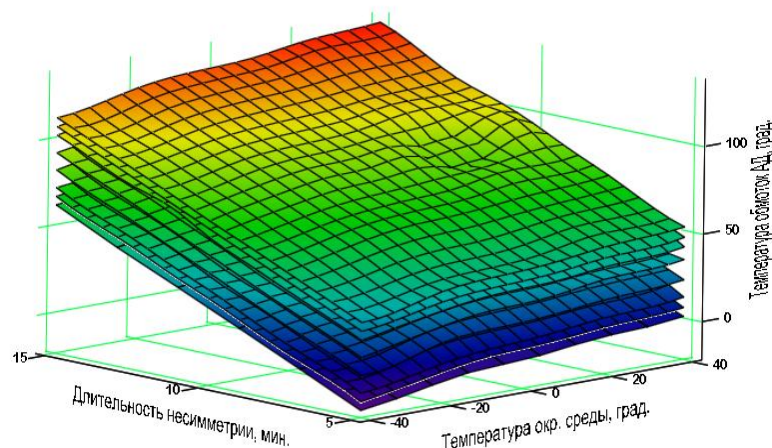


Рис.3. Зависимость температуры обмоток АД от внешних факторов при различных постоянных коэффициентах загрузки

Fig. 3. Dependence of the temperature of the AD windings on external factors at various constant load coefficients

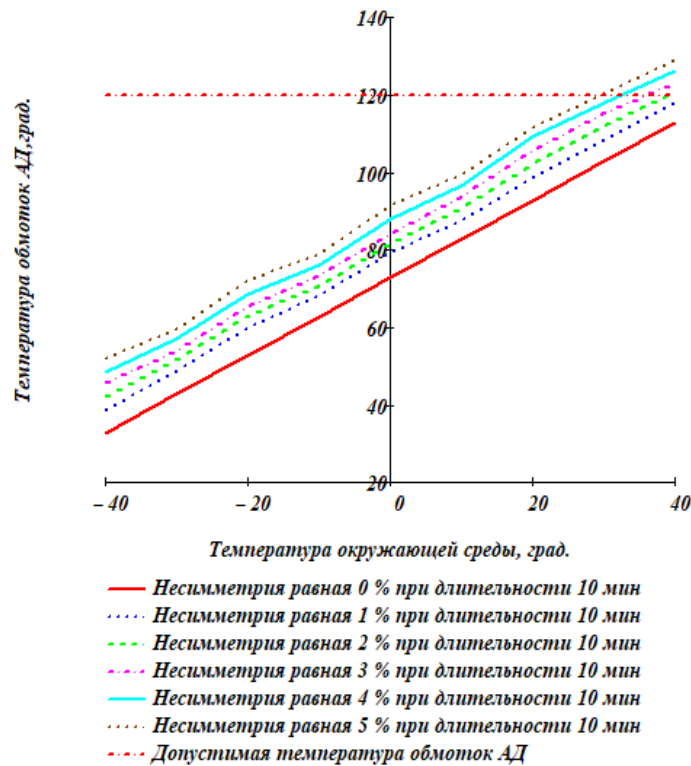


Рис. 4. Зависимость температуры обмоток АД от температуры окружающей среды при $K_{2U} = 0-5\%$ с постоянной величиной длительности несимметрии напряжений

Fig. 4. Dependence of the temperature of the AD windings on the ambient temperature at $K_{2U} = 0-5\%$ with a constant value of the duration of the voltage asymmetry

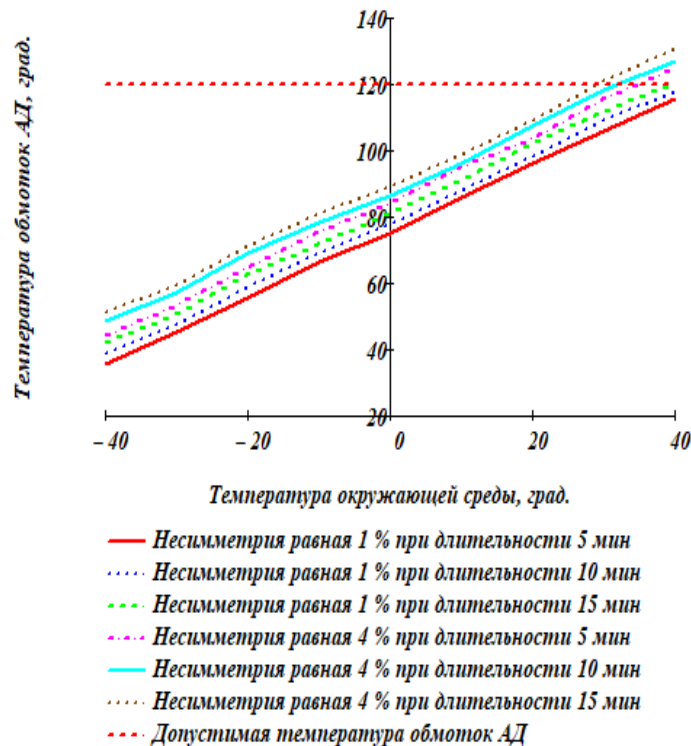


Рис. 5. Зависимость температуры обмоток АД от температуры окружающей среды при $K_{2U} = 1\%$; $K_{2U} = 4\%$ с различной длительностью несимметрии напряжений

Fig. 5. Dependence of the temperature of the AD windings on the ambient temperature at $K_{2U} = 1\%$; $K_{2U} = 4\%$ with different duration of voltage asymmetry

Обобщая экспериментальный материал выявлены следующие закономерности:

1) на эксплуатационную надёжность влияют не только внешние факторы непосредственно связанные с работой АД (несимметрия напряжений, нагрузка АД), но и климатические факторы (температура окружающей среды). Так, при $t_{окр} = 30^\circ\text{C}$, $K_{2U} = 4\%$ и $T = 10$ мин., температура обмоток АД превышает допустимую рабочую температуру электродвигателя. Тогда как, при тех же условиях, но при $t_{окр} = 20^\circ\text{C}$ температура обмоток АД не достигает допустимой рабочей температуры электродвигателя;

2) длительность несимметрии напряжений вносит значительный вклад в совокупное негативное влияние факторов. Так, например, при $K_{2U} = 1\%$ и $t_{окр} = 37^\circ\text{C}$, при $T = 5$ мин., температура обмоток АД составит 115°C ; тогда как, при тех же условиях, но при $T = 10$ мин., температура обмоток АД составит 118°C ; при $T = 15$ мин., температура обмоток АД составит 122°C ;

3) нагрузка АД является одним из факторов эксплуатационной надёжности электродвигателей. Так, например, при $K_z = 100\%$, $K_{2U} = 1\%$, $T = 10$ мин., при $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$ будет обеспечена стабильная работа электродвигателя. При превышении значения загрузки АД $K_z = 100\%$ необходимо скорректировать один из данных факторов с учётом реальных условий эксплуатации;

4) значительное снижение надёжности АД происходит при K_{2U} превышающее 4% . Чтобы исключить перегрев и преждевременный выход из строя АД, необходимо изменить один или несколько из исследуемых факторов. Так, например, при $K_{2U} = 3\%$, $T = 10$ мин., $t_{окр} = 34^\circ\text{C}$, $K_z = 88\%$ происходит начало перегрева изоляции обмоток АД, следовательно, следует уменьшить загрузку АД не менее чем на 10% ;

5) отобразить влияние ряда факторов на эксплуатационную надёжность АД целесообразно ранжированием данных факторов по величине вклада (веса). Используя алгоритм Штейнгауза-Форда-Джонсона [31] получили следующие ранги по убыванию величины вклада: наибольшее влияние, из исследуемых факторов, оказывает величина несимметрии напряжений, следующим фактором является нагрузка АД, после чего длительность несимметрии напряжений и наименьшее влияние оказывает температура окружающей среды. Ранжирование факторов основано на диапазоне изменения температуры обмоток АД от воздействия исследуемых факторов.

Построенная графическая зависимость (рис.6) характеризует множество возможных режимов работы АД с различными величинами внешних воздействий. Поверхность, представленная на графике, иллюстрирует ряд граничных точек допустимой работы АД, например, таких как $K_z = 100\%$, $K_{2U} = 5\%$, $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Эксплуатационный режим работы АД при различных величинах внешних воздействий представляет собой одну из точек поверхности, например, при $t_{окр} = 30^\circ\text{C}$ и $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Несмотря на то, что теоретически область допустимых значений велика, в реальных условиях эксплуатации АД она значительно уменьшится, в зависимости от специфики технологического процесса, в котором задействован электродвигатель.

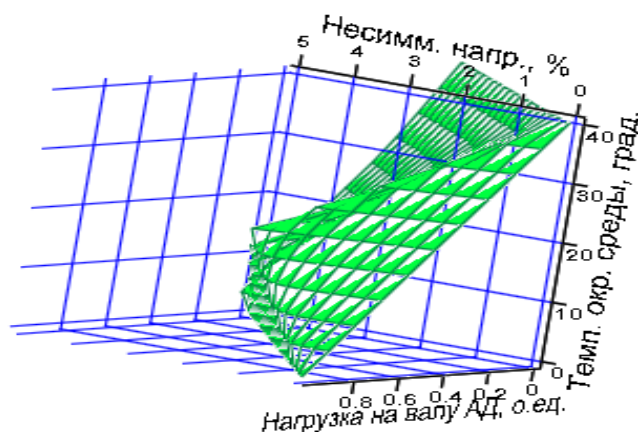


Рис. 6. Область допустимых значений исследуемых факторов

Fig. 6. The range of acceptable values of the studied factors

Таким образом, на основе комплекса исследований, выполненных с использованием имитационного моделирования в программной среде Matlab пакета Simulink сформулированы основные выводы:

- 1) воздействие неблагоприятных факторов кратно уменьшает надёжность асинхронных электродвигателей;
- 2) проведенные исследования показывают необходимость небольшой недогрузки АД при проектировании, эксплуатации объектов, содержащих электродвигательную нагрузку, для создания демпфера по нейтрализации негативного влияния внешних воздействий;
- 3) коридор колебаний температуры обмоток при изменении несимметрии напряжений и её длительности достигает 20°C , что значит даже при наличии недогрузки АД необходимо предусматривать мероприятия по снижению несимметрии напряжений при расположении объектов в зоне влияния мощной резко переменной несимметричной нагрузки;
- 4) экспериментальное исследование показало, что совокупное действие внешних факторов значительно превышает воздействие одного фактора;
- 5) количественный анализ внешних воздействующих факторов имеет ключевую роль при реализации технических решений (средств и методов), направленных на повышение надёжности асинхронных электродвигателей.

Систематизация условий эксплуатации АД, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов, показывает, что для обеспечения надёжной работы электродвигателей необходимо не допускать одновременного превышения следующих факторов: $K_z = 100\%$, $t_{\text{окр}} = 40^{\circ}\text{C}$, $K_{2U} = 4\%$, при $T = 10$ мин. Допускается кратковременное превышение одного из факторов на 20% от критической величины.

Заключение

Эффективность использования электрических машин в значительной степени определяется уровнем их эксплуатационной надёжности. Именно поэтому, анализ влияния эксплуатационных факторов на надёжность АД, представляющий количественную оценку параметров внешних воздействий, позволяет определить фактический вклад каждого из параметров, определить область допустимой работы асинхронных электродвигателей, кроме того, разработать технические решения, обеспечивающие длительную эксплуатацию электродвигателей с максимальной вероятностью их безотказной работы.

Литература

1. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин. М.: Издательский центр «Академия». 2010. 288 с.
2. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. 432 с.
3. Кожухов В.А., Стрижнев С.А. Обзор технологических отказов асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве // Вестник КрасГАУ. Красноярск: Изд-во КрасГАУ. 2006. №11. С. 199-202.
4. Tabora J.M., Tostes M.E., de Matos E.O. et al. Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors // IEEE Access. 2020. V.8. pp.186725-186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
5. Palácios R.S., da Silva I.N., Godoy W.F., et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults // Soft Computing. 2020. V. 24. pp. 16935 - 16946.
6. Campbell M., Arce G. Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. Issue.1. pp. 905-911.
7. Казаков Ю.Б., Андреев В.А. Влияние несимметрии напряжений на энергетические показатели асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2007. № 9-10. С. 73-80.
8. Singh S., Ajay S. Voltage Unbalance and Its Impact on the Performance of Three Phase Induction Motor: A Review // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2019. V. 7. Issue. VII.
9. Романова В.В., Хромов С.В. Влияние несимметрии питающих напряжений на режимы работы асинхронных электродвигателей // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Надёжность развивающихся систем энергетики. Вып. 69. В 2-х книгах. Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2018. С.402-411.
10. Tabora J.M., Tostes M.E., de Matos E.O., Soares T.M., Bezerra U.H. Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes // Energies. 2020. V. 13(13). 3333.

11. Tabora J.M., de Matos E.O., Soares T.M., et al. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes // Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Santo André, São Paulo, Brazil. 2020.
12. Ferreira F.J.T.E., Benoit Leprettre B., de Almeida A.T. Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. V.52. Issue. 4. pp. 3603 – 3610.
13. Mohammed J.A-K., Al-Sakini S.R., Hussein A.A. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2020. V.10. № 3.
14. Макаров В. Г. Идентификация параметров трёхфазного асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2010. № 3-4. С. 88-101.
15. Воронин В.А. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость асинхронных двигателей // Вестник КузГТУ. Кемерово: Изд-во КузГТУ. 2016. №5. С.67-73.
16. Романова В.В., Хромов С.В. Эксплуатационная надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений // Проблемы энерго - и ресурсосбережения. Ташкент: Изд-во ТашГТУ. 2019. № 4. С. 136-148.
17. Хомутов С.О. Анализ влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции электродвигателей // Ползуновский вестник. Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2005. №4. Ч.3. С. 260-267.
18. Пинчук О.Г. Оценка теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах при несимметрии напряжения сети // Вестник СевДТУ. 2008. № 88. С. 97-103.
19. Федоров М.М. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении // Кременчуг: Изд-во Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. 2004. №. 2 (25). С. 122-125.
20. Хомутов С.О., Кобозев Е.В. Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2006. №2. С. 4-8.
21. Герман-Галкин С., Кардонов Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона-принт. 2003. 256 с.
22. Paredes L., Molina M., Serrano B.R. Modeling of DSTATCOM devices to improve dynamic voltage stability in a microgrid with high penetration of motor loads // Revista Técnica Energía. 2020. №. 17. Issue. I. pp.32-42.
23. Boufadene M. Modeling and control of AC machine using MATLAB®/SIMULINK. Boca Raton: CRC Press. 2018. <https://doi.org/DOI: 10.1201/9780429029653>.
24. Kholiddinov I.Kh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev M.E., et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab) // The American Journal of Engineering And Techonology. 2020. V. 2. № 10. pp.33 – 37.
25. Omar A., Abdulrahman A., Rashed G. Direct on line operation of three phase induction motor using MATLAB // Journal of Zankoy Sulaimani. 2019. V.21(2). Part A. pp.21 – 24.
26. Оморев Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трёхфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93 – 102.
27. Общепромышленные асинхронные электродвигатели Электронный ресурс. http://electronpo.ru/dvigatel_air160s.
28. Дед А.В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2017. № 2 (152). С. 63-65.
29. Prakash C., Saini R. IoT-based monitoring and controlling of crop field and induction motor protection from voltage fluctuation // Agricultural Journal. 2020. Vol.15(4). pp.49 – 56.
30. Протокол №5. Претензионных испытаний электрической энергии по показателям качества. Филиал ОАО «МРСК Сибири» - «Читаэнерго». Испытательная лаборатория по качеству электрической энергии. 2015. 27 с.
31. Ключникова Е.В., Шитова Е.М. Методические подходы к расчёту интегрального показателя, методы ранжирования // Научно-практический журнал «ИнноЦентр». Тверь: Изд-во Тверской ИнноЦентр. 2016. №1(10). С. 4 – 18.

Авторы публикации

Романова Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры «Энергетики», Забайкальский государственный университет, г. Чита. E-mail: romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Энергетики», Забайкальский государственный университет, г. Чита. E-mail: sergeixrom@inbox.ru/

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения и электротехники» Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск. E-mail: souslov@istu.edu.

References

1. Goldberg OD. *Reliability of electric machines*. M.: Publishing center «Academy». 2010; 288 p.
2. Kuznetsov NL. *Reliability of electric machines*. M.: Publishing house MEI. 2006; 432 p.
3. Kozhukhov VA, Strizhnev SA. Review of technological failures of asynchronous motors in agricultural production. *Vestnik KrasGAU*. Krasnoyarsk: KrasGAU Publishing House. 2006; 11; 199 – 202.
4. Tabora JM, Tostes ME, de Matos EO, Bezerra UH, Soares TM, de Albuquerque BS. *Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors*. IEEE Access. 2020;8;186725-186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
5. Palácios RS, da Silva IN, Godoy WF, et al. *Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults*. Soft Computing. 2020; 24; 16935 – 16946. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04986-6>.
6. Campbell M, Arce G. *Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018; 54; 905–911. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2759085>.
7. Kazakov YuB, Andreev VA. Influence of voltage asymmetry on the energy performance of an asynchronous motor. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2007; 9-10; 73-80.
8. Singh S, Ajay S. Voltage Unbalance and Its Impact on the Performance of Three Phase Induction Motor: A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019; 7 p. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.7016>.
9. Romanova VV, Khromov SV. Influence of supply voltage asymmetry on operating modes of asynchronous electric motors. *Methodological issues of research on the reliability of large energy systems. Reliability of developing energy systems*. Otv. red. N.I. Voropai. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2018; 69:402-411.
10. Tabora JM, Tostes ME, de Matos EO, Soares TM, Bezerra UH. *Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes*. Energies. 2020; 13(13); 3333 p. <https://doi.org/10.3390/en13133333>.
11. Tabora JM, de Matos EO, Soares TM, Tostes ME. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. *Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Santo André, São Paulo, Brazil. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
12. Ferreira FJTE, Benoit Leprettre B, de Almeida AT. *Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors*. IEEE Transactions on Industry Applications. Issue. 4. 2016; 52; 3603 – 3610. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2545647>.
13. Mohammed JA-K, Al-Sakini SR, Hussein AA. *Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor*. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2020; 10; 3. <https://doi.org/http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
14. Makarov VG. Identification of the parameters of a three-phase asynchronous motor. *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2010;3-4; 88-101.
15. Voronin VA. Analysis of factors affecting the noise immunity of asynchronous motors. *Bulletin of KuzGTU*. Kemerovo: Izd-vo KuzGTU. 2016; 5; 67-73.
16. Romanova VV, Khromov SV. Operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors in conditions of voltage asymmetry. *Problems of energy and resource saving. Tashkent: Publishing house of Tashkent state University*. 2019; 4; 136-148.
17. Khomutov SO. Analysis of the influence of external factors on the state of insulation electric motors. *Polzunovsky Vestnik*. Barnaul: Publishing center of AltSTU named after I.I. Polzunov. Pt 3. 2005; 4; 260-267.
18. Pinchuk OG. Estimation of the thermal state of asynchronous motors in repeated-short-term modes with network voltage asymmetry. *Vestnik SevDTU*. 2008; 88; 97-103.
19. Fedorov MM. *Features of the thermal state of asynchronous motors with asymmetric supply voltage*. Kremenchug: Publishing house of the Kremenchuksky state Politechnical University. 2004; 2 (25); 122-125.
20. Khomutov SO, Kobozev EV. *Predicting the probability of failure-free operation of electric motors based on a quantitative assessment of the degree of influence of influencing*

factors. Polzunovsky Vestnik. Barnaul: Publishing center of AltSTU named after I. I. Polzunov. 2006; 2; 4-8.

21. German-Galkin S, Kardonov G. *Electric machines: laboratory work on PC*. SPb.: Korona-print. 2003; 256 p.

22. Paredes L, Molina M, Serrano BR. *Modeling of DSTATCOM devices to improve dynamic voltage stability in a microgrid with high penetration of motor loads*. Revista Técnica Energía. Issue.I. 2020;7;32-42. <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V17.N1.2020.400>.

23. Boufadene M. *Modeling and control of AC machine using MATLAB®/SIMULINK*. Boca Raton: CRC Press. 2018. <https://doi.org/10.1201/9780429029653>.

24. Kholiddinov IKh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev ME., Tuyschiev ZZ., Kholiddinova MM. *Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab)*. The American Journal of Engineering And Techonology. 2020;2(10);33-37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>.

25. Omar A, Abdulrahman A, Rashed G. *Direct on line operation of three phase induction motor using MATLAB*. Journal of Zankoy Sulaimani. Part A. 2019; 21(2); 21-24. <https://doi.org/10.17656/jzs.10754>.

26. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. On the problem of mathematical modeling of a three-phase asymmetric distribution network. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2020;22(1); 93-102. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102>.

27. *General industrial asynchronous electric motors* (Electronic resource). http://electronpo.ru/dvigatel_air160s.

28. Ded AV. *On the problem of the current state of the levels of voltage and current asymmetry indicators in 0.4 kV networks*. Omsk scientific bulletin. Omsk: Publishing house OmGTU. 2017;2(152);63-65.

29. Prakash C, Saini R. IoT-based monitoring and controlling of crop field and induction motor protection from voltage fluctuation. *Agricultural Journal*. 2020;15(4); 49-56. <https://doi.org/10.36478/aj.2020.49.56>.

30. *Protocol № 5. Claim tests of electric energy by quality indicators*. The branch of JSC «DGC of Siberia» – «Chitaenergo». Testing laboratory for the quality of electrical energy. 2015; 27 p.

31. Klyushnikova EV, Shitova EM. Methodological approaches to calculating the integral indicator, ranking methods. *Scientific and practical journal «Innocenter»*. Tver: Tver Innocenter Publishing House. 2016;1 (10);4-18.

Authors of the publication

Victoria V. Romanova –Trans-Baikal State University, Chita, Russia. E-mail: romanova181@mail.ru.

Sergey V. Khromov – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. E-mail: sergeixrom@inbox.ru.

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: souslov@istu.edu.

Получено 23.04.2021

Отредактировано 12.05.2021

Принято 23.05.2021



ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОЗАБОРОВ ЗА СЧЁТ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫВНОЙ ВОДЫ И СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ФИЛЬТРОЦИКЛА

А. А. Капанский

Гомельский государственный технический университет
им. П.О. Сухого (Беларусь), г. Гомель, Республика Беларусь
kapanski@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование поиска путей уменьшения энергопотребления и развития методов повышения энергоэффективности водоканалов. Отраженные в статье исследования базируются на результатах энергетического обследования водоканала города Гомель (Республика Беларусь) одной из задач актуальных задач которого являлся поиск резервов экономии ТЭР за счет снижения технологических расходов воды. В статье приводятся результаты исследований на примере двух водозаборов «Ипуть» и «Союз». **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялись методы математической статистики, в том числе, для оценки значимости влияния промывки воды на снижение содержания железа использован метод дисперсионного анализа. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье рассматриваются возможные пути снижения затрат электроэнергии за счет уменьшения технологических расходов воды, которые используются на промывку фильтровальных сооружений. В качестве основных мероприятий выделены следующие: изменение графика промывки фильтров с увеличением фильтроцикла; использование водовоздушной промывки; повторное использование промывной воды. В статье сформулирована гипотеза: промывка фильтров приводит к снижению содержания железа в воде, т.е. улучшению качества очистки. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Повышение энергетической эффективности водозаборов наряду с мероприятиями по модернизации и оптимизации работы насосного оборудования достигается путем экономии водных ресурсов и, соответственно, затрат электроэнергии на их добычу необходимую при промывке фильтровальных материалов станции обезжелезивания. Предположением о возможном увеличении фильтроцикла являлось отсутствие значимости влияния промывки на снижение содержания железа, что свидетельствовало о наличии значительного запаса промывочного цикла. Использование совместной водяной и воздушной промывки, способствует значительному снижению как технологических расходов воды (40,1 %), так и расходов электроэнергии (38,8 %). Потенциал энергосбережения за счет сокращения технологических расходов электроэнергии на подъем воды с целью промывки достигал для исследуемого водозабора 89857 кВт·ч / год.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; энергосбережение; повышение энергетической эффективности; увеличение фильтроцикла; повторное использование промывной воды.

Для цитирования: Капанский А.А. Повышение энергетической эффективности водозаборов за счёт повторного использования промывной воды и сокращения времени фильтроцикла // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 90-102. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-90-102.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF WATER INLETS BY RE-USING WASHED WATER AND REDUCING FILTER CYCLE TIME

AA. Kapansky

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus
kapanski@mail.ru

Abstract: *PURPOSE.* The purpose of this article is to study the search for ways to reduce energy consumption and develop methods for increasing the energy efficiency of water utilities. The studies reflected in the article are based on the results of an energy survey of a water utility in the city of Gomel (Republic of Belarus), one of the tasks of which is the search for reserves for saving fuel and energy resources by reducing technological water consumption. The article presents the results of research on the example of two water intakes «Iput» and «Sozh». *METHODS.* When solving the problem, the methods of mathematical statistics were used, including the method of analysis of variance to assess the significance of the effect of water flushing on reducing the iron content. *RESULTS.* The article discusses possible ways to reduce energy costs by reducing technological water consumption, which are used to flush filtering structures. The main activities are the following: changing the filter flushing schedule with increasing the filter cycle; the use of water-air flushing; reuse of wash water. The article formulates a hypothesis: filter flushing leads to a decrease in the iron content in the water, i.e. improving the quality of cleaning. *CONCLUSION.* An increase in the energy efficiency of water intakes, along with measures to modernize and optimize the operation of pumping equipment, is achieved by saving water resources and, accordingly, the cost of electricity for their extraction, which is necessary when flushing the filter materials of the deferrization station. The assumption about a possible increase in the filtration cycle was the lack of significance of the influence of washing on the decrease in the iron content, which indicated the presence of a significant reserve of the washing cycle. The use of combined water and air flushing contributes to a significant reduction in both technological water consumption (40.1%) and electricity consumption (38.8%). The energy saving potential due to the reduction of technological energy consumption for lifting water for the purpose of flushing reached 89857 kWh / year for the studied water intake.

Keywords: energy efficiency, energy saving; increasing energy efficiency; increasing the filtration cycle; reuse of rinse water.

For citation: Kapansky AA. Increasing the energy efficiency of water inlets by re-using washed water and reducing filter cycle time. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):90-102. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-90-102.

Введение и литературный обзор

Выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на снижение себестоимости производимой продукции или оказываемых услуг, всегда остается актуальной задачей в современных условиях функционирования промышленных и жилищно-коммунальных потребителей. Совершенствование методической базы проведения исследований энергоэффективности работы предприятий водопроводно-канализационного хозяйства базируется на развитии методов *оценки, управления, прогнозирования и повышения* энергоэффективности.

Существующие *методы оценки* энергоэффективности работы водоканалов основаны во многом на анализе работы единичных электроприемников [1, 2, 3] и сравнении основных энергетических показателей с номинальными параметрами или с

данными современного и технологичного оборудования. Для комплексной оценки систем водоснабжения и водоотведения в целом используются методы, учитывающие чувствительность изменения удельного расхода электропотребления при отклонении объемов производственной программы [4].

Стоимость энергетических ресурсов оказывает значительное влияние на формирование тарифов услуг водоканалов, поскольку в структуре себестоимости подъема и подачи воды, перекачки и очистки стоков доля энергетики достигает 25 %. Совершенствование *методов управления* энергопотреблением, направленных на поиск регуляторов электрической мощности, позволяет значительно снизить оплату за электрическую энергию за счет смещения графика нагрузки в тарифную зону с минимальной стоимостью электроэнергии. В статье [5] в качестве регуляторов электрической мощности рассматриваются накопительные резервуары чистой воды, которые максимально заполняются в ночной тарифной зоне, при этом в пиковой зоне, где оплата электроэнергии максимальная, предполагается отключение скважинных насосов.

Развитие методов *прогнозирования* энергоэффективности имеет важное значение на всех стадиях процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии. Для промышленных и коммунально-бытовых потребителей топливно-энергетических ресурсов достоверное определение пика электрической нагрузки позволяет снизить величину оплаты за заявленную мощность, а качественное планирование общих и удельных расходов электрической энергии позволяет с наименьшей погрешностью учесть энергетическую составляющую в структуре себестоимости производимой продукции и избежать штрафных санкций за перерасход электрической энергии [6, 7, 8]. В статьях [9, 10] рассматриваются методы прогнозирования показателей энергоэффективности, учитывающие ввод в эксплуатацию дополнительных трубопроводных сетей, насосного оборудования, внедрение мероприятий по энергосбережению, изменение качества очистки и объемов питьевых и сточных вод.

Для традиционных систем водоснабжения и водоотведения, состоящих из группы насосных станций, трубопроводных сетей, систем очистки питьевой воды и стоков к основным энергосберегающим мероприятиям относятся замена устаревшего оборудования на современное энергоэффективное, оптимизация и автоматизация режимов работы насосных агрегатов. Повышение эффективности использования тепловой энергии на отопление водозаборов основано на автоматизации и модернизации действующей системы теплоснабжения [11, 12].

В последние годы энергоэффективность водоканалов значительно возросла в связи с чем экономический эффект от проводимых энергосберегающих мероприятий заметно сократился [13]. Поиск резервов экономии энергетических ресурсов привел к разработке метода оценки потенциала энергосбережения при частотном регулировании режимов работы насосных агрегатов, работающих на водонапорную башню за счет снижения избыточного давления подъема воды и сокращения потерь электроэнергии при пуске двигателя [14]. Целью данной статьи является дальнейшее исследование поиска путей уменьшения энергопотребления и развития методов *повышения энергоэффективности* водоканалов. Отраженные в статье исследования базируются на результатах энергетического обследования КПУП «Гомельводоканал» одной из задач актуальных задач которого являлся поиск резервов экономии ТЭР за счет снижения технологических расходов воды. В статье приводятся результаты исследований на примере двух водозаборов «Ипуть» и «Сож».

Материалы и методы

К технологическим расходам воды системы водоснабжения предприятий водопроводно-канализационного хозяйства относятся:

1. Расходы воды между сооружениями 1-го и 2-го подъёмов, включающие: промывку фильтровальных сооружений; дезинфекцию и промывку скважин;

приготовление растворов реагентов; профилактическую чистку и дезинфекцию резервуаров чистой воды; производственные нужды лабораторий и др.

2. Расходы воды на отдельно стоящих объектах вспомогательного назначения и административных зданиях.

3. Поливомоечные расходы отдельно расположенных территорий объектов водоснабжающей организации.

4. Расход воды на транспортирование воды от насосной станции 2-го подъема до потребителя, включающий: промывку и дезинфекцию водопроводных сетей, законченных строительством; промывку и дезинфекцию баков водонапорных башен; отбор проб из водоразборных колонок.

Обобщённо технологические расходы объединены в две группы: I группа – технологические расходы воды при подъеме и водоподготовке (до прибора учета подачи воды в водораспределительную сеть); II группа – технологические расходы воды при транспортировании воды (от прибора учета подачи воды в водораспределительную сеть до потребителя).

Автор статьи рассматривает возможные пути снижения затрат электроэнергии за счет уменьшения технологических расходов воды I группы, в частности объемов воды, которые используются на промывку фильтровальных сооружений. В качестве основных мероприятий можно выделить следующие направления: изменение графика промывки фильтров с увеличением фильтроцикла; использование водовоздушной промывки; повторное использование промывной воды.

Для исследуемых водозаборов выбор контролируемых показателей питьевой воды основан на базовой информации, имеющейся в лаборатории питьевого водоснабжения. Для достижения качества воды, соответствующего требованиям СанПиН 10-124 РБ-99, на водозаборе предусмотрено обезжелезивание воды методом упрощенной аэрации на скорых фильтрах. В качестве загрузки фильтров использовался кварцевый песок. Параметры промывочного цикла, интенсивности и времени промывки определены опытным путем в процессе эксплуатации и закреплены в технологическом регламенте водозабора.

Предпосылки к регулированию промывочного цикла

Использование методов математической статистики и, в частности, методов дисперсионного анализа позволили оценить значимость промывки фильтров на изменение химических показателей качества воды водозабора «Ипуть» [15]. Станция обезжелезивания оборудована 4 фильтрами, полезная площадь каждого фильтра – 55,4 м². Для исследуемого водозабора предварительно отобран перечень контролируемых и фиксируемых показателей качества воды, в который вошли наиболее значимые факторы, характеризующие стабильность качества воды в источниках, вероятность вторичного загрязнения питьевой воды в процессе ее хранения и транспортирования, а также наличие загрязнения радионуклидами на территории водозабора. Из исходного множества химических показателей в итоговую анализируемую статистику вошли только данные, отражающие содержание железа в воде на входе и выходе фильтров. Это позволило исключить мультиколлинеарность факторов, выполнить условие их вариации и обеспечить репрезентативность выборки за счёт выбора факторов, потенциально влияющих на энергетическую составляющую процесса водоочистки.

Существующая схема промывки предусматривает очистку фильтров в шахматном порядке каждые 48 часов в среднем в течение пяти минут. Регистрация параметров качества воды производится в журнале химической лаборатории, учет объемов промывной воды – в журнале очистки фильтров. В таблице 1 приведен анализируемый фрагмент совмещения журнала очистки фильтров и журнала химической лаборатории за 2019 год.

Как видно из таблицы 1 не все показатели качества очистки попали во временную зону включения промывных насосов и, соответственно, подачи воды на фильтры.

Отсутствующие данные (пустоты) расхода воды на промывку заполнялись «нулями», а показатели железа на входе фильтра и выходе заполнялись ближайшими соседними значениями. Оценка качества очистки фильтра выполнена по показателю разницы между содержанием железа на входе и выходе фильтра:

$$\Delta Fe = Fe_{\text{вх}}^{2+} - Fe_{\text{вых}}^{2+} \quad (1)$$

где $Fe_{\text{вх}}^{2+}$, $Fe_{\text{вых}}^{2+}$ – двухвалентное железо на входе и выходе фильтра, мг/дм³.

Таблица 1

Фрагментов журнала очистки фильтров и журнала химической лаборатории
водозабора «Ипуть»

Дата и время	Расход воды на промывку, м³				Время промывки, мин	Железо, мг/дм³				
	Фильтр №					Поступающая	Фильтр №			
	1	2	3	4			1	2	3	4
01.01.19 10:00	0	415	0		5	3,42	0,12	0,11	0,1	0,12
01.01.19 11:00	0	0	0	335	5	Отсутствующие данные				
01.01.19 20:00	0	0	0	0	0	3,76	0,13	0,11	0,12	0,14
02.01.19 10:00	0	0	0	0	0	3,08	0,09	0,12	0,11	0,13
02.01.19 20:00	0	0	0	0	0	4,03	0,09	0,11	0,091	0,12
03.01.19 10:00	427	0	0	0	5	3,62	0,11	0,15	0,13	0,04
03.01.19 11:00	0	0	438	0	5	Отсутствующие данные				
03.01.19 20:00	0	0	0	0	0	3,56	0,1	0,13	0,11	0,065
04.01.19 10:00	0	0	0	0	0	5	0,1	0,07	0,1	0,16
04.01.19 11:00	0	440	0	0	5	Отсутствующие данные				
04.01.19 12:00	0		0	443	5	Отсутствующие данные				
04.01.19 20:00	0		0	0	0	4,31	0,09	0,095	0,08	0,13
05.01.19 10:00	0		0	0	0	3,25	0,12	0,11	0,093	0,14
05.01.19 20:00	0		0	0	0	3,9	0,07	0,1	0,07	0,13

Гипотеза: промывка фильтра приводит к увеличению ΔFe , т.е. улучшению качества очистки. Предполагалось, что к концу фильтроцикла остаточное содержание железа значительно снижается, а при приближении к концу фильтроцикла (непосредственно перед промывкой) – значительно увеличивается. Таким образом, ожидаемый результат – наличие корреляции между промывкой и степенью очистки.

В таблице 2 приведены результаты сравнения показателей очистки ΔFe на различных этапах промывки.

Таблица 2

Сравнение показателей очистки ΔFe в момент промывки и между промывками

Показатели	Интервал времени		Отклонение, %
	В момент промывки	Между промывками	
Среднее значение содержания железа поступающей воды, мг/л	3,653	3,646	-0,2%
Среднее значение содержания железа на выходе фильтра, мг/л	0,111	0,102	-8,5%
Снижение содержания железа ΔFe после промывки, мг/л	3,541	3,544	0,1%

Как видно из таблицы 2 в среднем качество очистки фильтра в момент и после промывки увеличилось незначительно на 0,1 %. На рисунке 1 также видно, что

сформированные средние значения двух подгрупп факторов не изменились. P -значение в результате проведенного дисперсионного анализа составило 0,95, что значительно больше принятого уровня значимости $\alpha=0,05$. Нулевая гипотеза о значимости влияния промывки на снижение содержание железа отклонена. На рисунке 1 приведено корреляционное поле с выделенными двумя классами факторов, средние значения которых соединены пунктиром.

Поскольку статистически значимого снижения содержания железа на выходе фильтра после промывки не наблюдалось, сделан вывод о наличии значительного запаса промывочного цикла. В качестве рекомендаций предложено проведение активного эксперимента с изменением времени промывки, объемов и показателей качества воды для возможности установления достоверной границы увеличения фильтроцикла при условии соблюдения установленных нормативов качества питьевой воды.

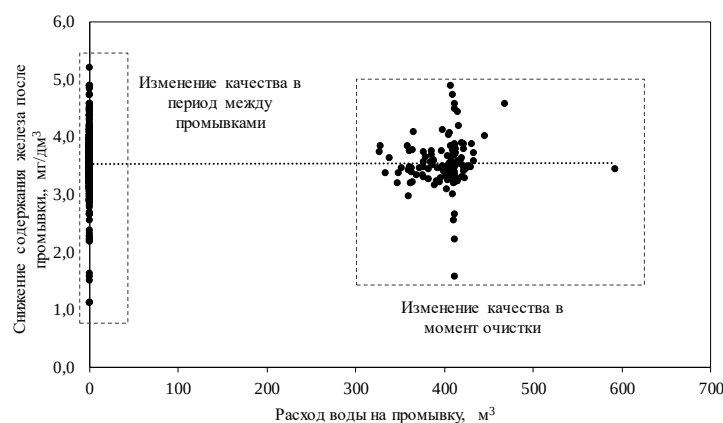


Рис. 1. Корреляционное поле факторов «объем промывной воды» и «степень снижения содержания железа после очистки фильтра»

Fig. 1. Correlation field of the factors "the volume of washing water" and "the degree of reduction of the iron content after cleaning the filter"

Применение водовоздушной очистки фильтров

По мере накопления железа фильтрующий материал загрязняется. Для ускорения процесса очистки фильтров возможно использование одновременно как водяной, так воздушной промывки, которая обладает более сильным действием при небольших расходах промывной воды. На исследуемом водозаборе «Ипуть» проводился эксперимент с подключением компрессора дизельного компрессора ММЗ-ПВ-6/7 мощностью 40,5 кВт, производительностью 360 м³/ч (6000 л/мин) и давлением 0,7 МПа к существующему трубопроводу подачи воды. Схема подключения приведена на рисунке 2. В таблице 3 приведены агрегированные фактические годовые показатели расходов воды на промывку фильтров водозабора «Ипуть».

Таблица 3

Фактические показатели расходов воды на промывку водозабора «Ипуть»

Показатель	Номер фильтра				Итого
	1	2	3	4	
Суммарный объем промывной воды по фильтрам, м³	48 424	51 452	50 054	50 101	200 031
Время промывки, мин	121	123	119	123	2 430
Средний объем единичной промывки в течение пяти минут, м³	400	418	421	407	412
Количество промывок в год	121	123	119	123	486

Таким образом, в соответствии с журналом работы водозабора суммарный объем воды на промывку фильтров за 2019 год составил 200 031 м³. В среднем в сутки

осуществляется две промывки в течение 5-и минут. В общей сложности в течение года выполнено 486 промывок с суммарным затраченным временем 2 430 минуты. При отсутствии приборов учета, годовой расход воды на промывку фильтров может быть определен расчетным путем исходя из интенсивности и времени промывки:

$$Q_{\text{тех}} = \sum_i^n \left(\frac{8760 \cdot I \cdot n \cdot F_i \cdot t_{\text{пром.}i}}{T_{\text{ц}}} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где n – количество фильтров; шт.; I – интенсивность промывки, л/(с·м²); F_i – площадь i -го фильтра, м²; $t_{\text{пром.}i}$ – время промывки, с; $T_{\text{ц}}$ – промывочный цикл, ч.

После подключения компрессора время проверки сократилось с 5-и минут до 3-х при сохранении показателей качества очистки воды. Для реализации технологической схемы рисунка 2 с одной стороны ожидается прирост затрат электроэнергии за счет работы компрессора, с другой – снижение за счет уменьшения объемов подаваемой воды.

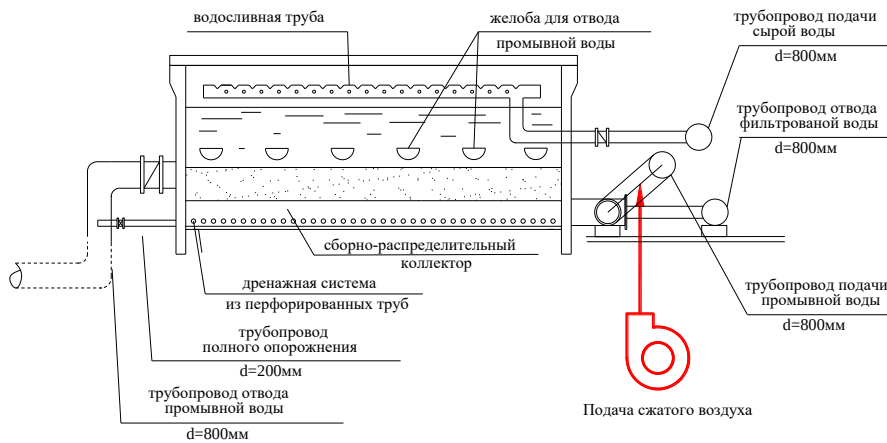


Рис. 2. Схема существующего фильтра с подключением компрессора

Fig. 2. Diagram of the existing filter with compressor connection

При известных номинальных параметрах мощность компрессора определяется по формуле [16]:

$$P_k = \frac{l_k \cdot q}{3600 \cdot \eta}, \quad (3)$$

где l_k – работа компрессора при сжатии воздуха, кДж/м³; q – расход воздуха, м³/ч; η – КПД компрессора.

Для политропного процесса работа сжатия определяются по формуле [17]:

$$l_k = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot p_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (4)$$

где n – показатель политропы; p_1 – абсолютное давление всасывания, кПа; v_1 – начальный всасываемый объем воздуха, м³; ρ_1 – плотность воздуха на всасе, кг/м³; p_2 – абсолютное давление сжатия компрессора, кПа.

Дополнительное включение компрессора обеспечит прирост мощности на 32,2 кВт при расчётной работе сжатия $l_k = 323$ кДж/м³. Вместе с этим, водовоздушная промывка обеспечит снижение технологических расход воды в среднем 40,1 % или на 96

$Q_{\text{тех.к}} = 80190 \text{ м}^3$, что определено экспериментально на водозаборе. Прирост затрат электроэнергии за счет включения компрессора определяется по формуле:

$$W_{\text{к}} = P_{\text{к}} \cdot t_{\text{пром}} \cdot n_{\text{пром}}, \quad (5)$$

где $n_{\text{пром}}$ – количество промывок в течение года.

Прогнозируемый прирост затрат электроэнергии при работе компрессора:

$$W_{\text{к}} = 32,2 \cdot 3 \cdot 486 / 60 = 782 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}.$$

Среднегодовой удельный расход электроэнергии на подъем воды исследуемого за 2019 год составил $w_{\text{уд.скв}} = 300,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{тыс. м}^3$. Затраты электроэнергии на технологические нужды определяется по формуле:

$$W_{\text{в}} = w_{\text{уд.скв}} \cdot Q_{\text{тех}}. \quad (6)$$

Фактические годовое объемы промывной воды составили $200\,031 \text{ м}^3$. Затраты электроэнергии, определяемые потребностью в промывной воде до внедрения водовоздушной промывки:

$$W_{\text{в}} = 300,5 \cdot 200\,031 \cdot 10^{-3} = 60109 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}.$$

Суммарные затраты электроэнергии после реализации водовоздушной промывки определяется разницей между требуемыми объемами технологических расходов воды:

$$W_{\text{вк}} = w_{\text{уд.скв}} \cdot (Q_{\text{тех}} - Q_{\text{тех.к}}) + W_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{тех.к}}$ – ожидаемое снижение технологических расходов воды, м^3 .

Прогнозируемое снижение затрат электроэнергии на технологические нужды водозабора:

$$W_{\text{вк}} = 300,5 \cdot (200\,031 - 80\,190) + 782 = 36794 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}.$$

Применение водовоздушной очистки фильтров для исследуемого водозабора способствовала значительному снижению как технологических расходов воды (40,1 %), так и расходов электроэнергии (38,8 %).

Внедрение сооружения повторного использования промывных вод

Классическая схема промывки фильтров предусматривает подачу воды через распределительную систему и слои загрузки фильтровального материала. Скорость прохождения через фильтр промывной воды в несколько раз больше скорости фильтрования. Вода взмучивает песок и интенсивно оmyвает его от поступивших в процессе фильтрования загрязнений. Как правило, вода после промывки сбрасывается в канализацию. С целью сокращения использования подземной воды на собственные нужды и повышения эффективности работы водозабора реализуются схемы повторного использования промывной воды, апробированные на коммунальном предприятии КПУП «Гомельводоканал» на водозаборе «Ипуть». Основным элементом технологической схемы являются отстойники (рисунок 3), в которые вода после промывки фильтров поступает по напорно-самотечному трубопроводу на отстаивание. После 8-ми часового отстаивания вода равномерно через поплавков поступает в колодец-усреднитель. Из колодца-усреднителя вода

перекачивается погружным насосом на осветлительные фильтры, откуда поступает в трубопровод отвода фильтрованной воды после фильтров станции обезжелезивания.

Для оценки потенциала энергосбережению после реализации схемы повторного использования технологической воды на крупнейшем водозаборе «Сож» выполнен анализ затрат воды на технологические нужды.

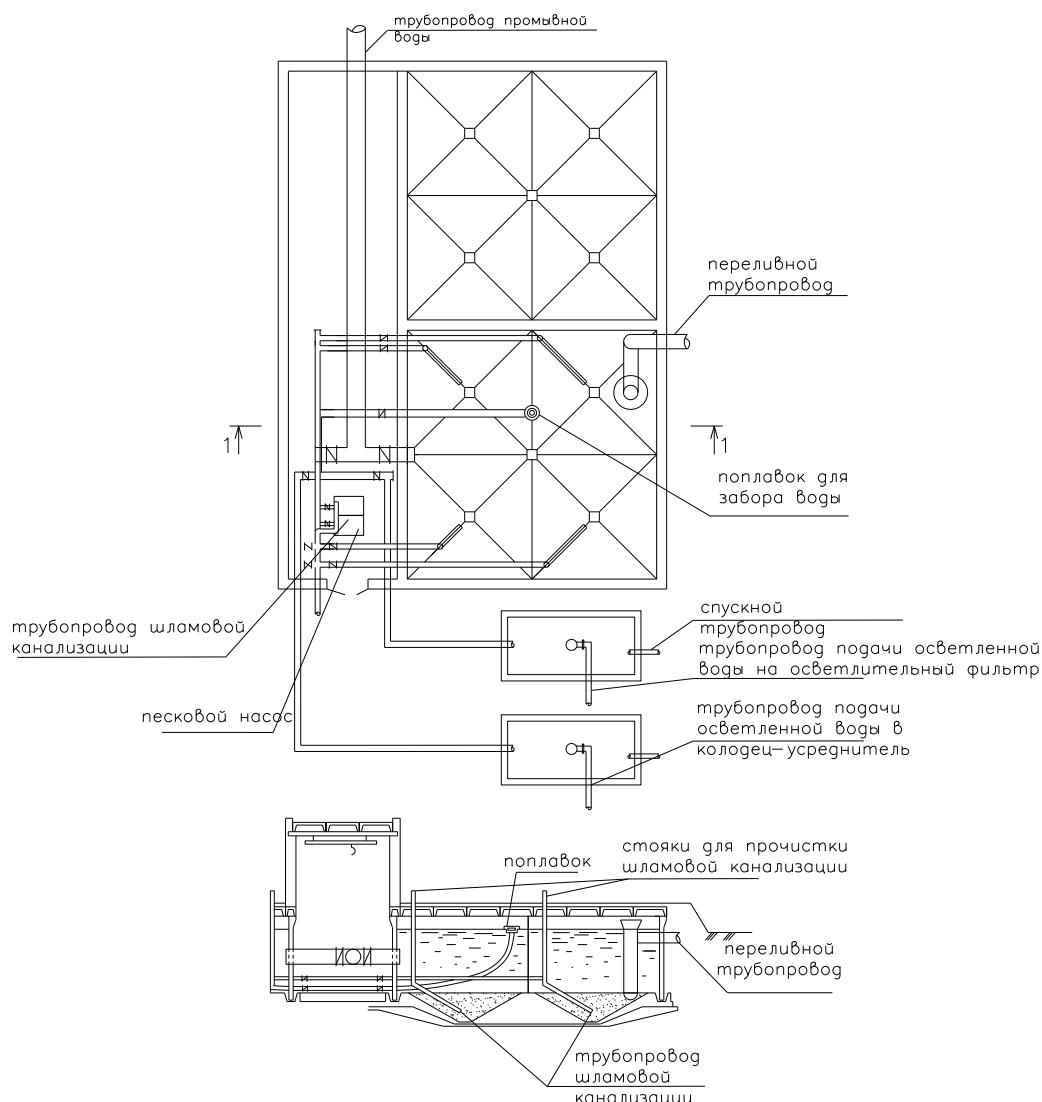


Рис. 3. Типовая схема сооружений
повторного использования технологической
воды

Fig. 3. A typical scheme of facilities for the
reuse of process water

На рисунке 4 приведена статистическая взаимосвязь между подъемом и подачей воды водозабора. Степень взаимосвязи – высокая, коэффициент корреляции Пирсона составил 0,96. Разница между подъемом и подачей воды определяют технологические нужды станции, которые по данным журнала насосной станции второго подъема за 2019 год составили 318 755 м³.

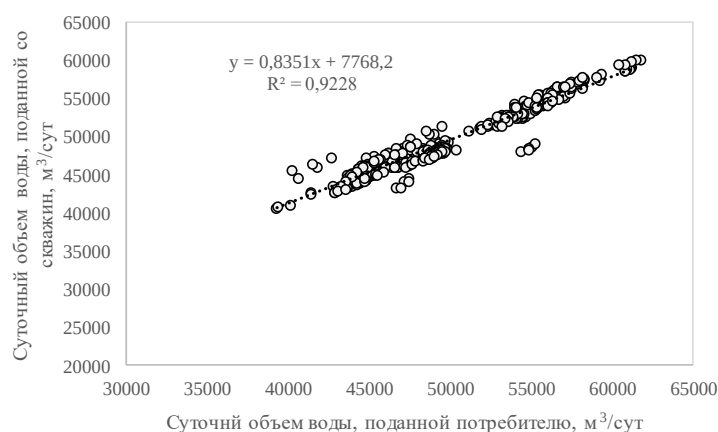


Рис. 4. Связь подъема и подачи воды водозабора «Сож»

Fig. 4. Connection of lifting and water supply of the water intake "Sozh"

Станция обезжелезивания водозабора «Сож» оборудована 14 скорыми открытыми фильтрами с размерами 6х12 м и полезной площадью каждого фильтра – 55,4 м². В таблице 4 приведен фрагмент существующего графика промывки на примере 4-х фильтров.

Таблица 4

Определение технологических расходов воды по фильтрам водозабора «Сож»

Время и дата промывки	Расход воды на промывку, м³					Время промывки, мин
	Фильтр №				Итого	
	1	2	3	4		
01.01.19 23:00		357			375	5
02.01.19 23:00	269			272	541	5
03.01.19 23:00			299		299	5
04.01.19 23:00		355		359	714	5
05.01.19 23:00	349			351	700	5
06.01.19 23:00			343		343	5
07.01.19 23:00		329			329	5
Среднее	308	341	333	310	323	5

С целью снижения емкости отстойника оптимизирован график промывки фильтров, учитывающий существующий фильтроцикл 72 часа и 8-и часовое время отстаивания воды.

Таблица 5

Оптимизация графика промывки фильтров водозабора «Сож»

Номер суток	Часы суток	Номер фильтра														Средний расход воды на промывку фильтра, м³	Суммарный расход воды на промывку, м³
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1	8	+											+			323	646
	16		+											+		323	646
	24			+											+	323	646
2	32				+											323	323
	40					+										323	323
	48						+									323	323
3	56							+								323	323
	64								+							323	323
	72									+						323	323

Результаты и обсуждения

После оптимизации схемы промывки фильтров удалось значительно снизить пиковые объемы воды после промывки и уменьшить предварительны принятые объемы отстойника. Расход воды на промывку в течение 8 часов до оптимизации превышал 1000 м^3 , в то время как после оптимизации – составил 646 м^3 . Повторное использование промывной воды обеспечивает повышение эффективности работы водозабора за счет снижения расхода электроэнергии на технологические нужды. При средневзвешенном удельном расходе электроэнергии на подъем воды, который составил $281,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{тыс. м}^3$ (определен по результатам анализа статистических наблюдений системы учета «Акватория») потенциал энергосбережения за счет сокращения технологических расходов электроэнергии с целью промывки составил $89857 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{год}$.

Выводы

Повышение энергетической эффективности водозаборов наряду с мероприятиями по модернизации и оптимизации работы насосного оборудования достигается путем экономии водных ресурсов, затрачиваемых на промывку фильтровальных материалов станции обезжелезивания. Поэтапное оптимизация технологических расходов воды состоит из оценки возможности увеличения фильтроцикла, использования водовоздушной промывки и повторного использование промывной воды.

Предположением о возможном увеличении фильтроцикла является отсутствие значимости влияния промывки на снижение содержание железа, что свидетельствует о наличие значительного запаса промывочного цикла. Использование совместной водяной и воздушной промывки, способствует значительному снижению как технологических расходов воды ($40,1 \%$), так и расходов электроэнергии ($38,8 \%$). Потенциал энергосбережения за счет сокращения технологических расходов электроэнергии на подъем воды с целью промывки достигал для исследуемого водозабора $89857 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{год}$.

Литература

1. Hakimyanov M.I., Guzeev B.V., Ryabishina L.A. Methodological bases calculation of power consumption of electric drives booster and group pumping station // Electrical and data processing facilities and systems. 2014. № 3. V. 10. P. 15–20.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(2):65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.
3. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. Моделирование потребления электроэнергии приводами насосов при дроссельном и частотном регулировании производительности. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19(3-4). С. 96-106.
4. Грунтович Н.В., Капанский А.А. Оценка текущего состояния энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения // Энергоэффективность. 2016. № 8. С. 20–24.
5. Kapanski A., Hruntovich N., Bakhur S., et al. Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks. In E3S Web of Conferences. 2018. V. 178. p. 01065. EDP Sciences.
6. Douglas A.P. et al. Risk due to load forecast uncertainty in short term power system planning // IEEE Transactions on Power Systems. 1998. T. 13. №. 4. P. 1493-1499.
7. Douglas A.P. et al. The impacts of temperature forecast uncertainty on Bayesian load forecasting // IEEE Transactions on Power Systems. 1998. T. 13. №. 4. P. 1507-1513.
9. Грунтович Н.В., Капанский А.А. Прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоотведения при изменении качества очистки и объема стоков // Энергия и менеджмент. 2016. № 4. С. 18–23.
8. Fedorov O.V. Expeditious forecasting of power consumption // 2017 International

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2017. С. 1-4.

10. Капанский А. А. Управление энергоэффективностью трубопроводных систем водоотведения на основе многофакторного моделирования режимов электропотребления // Агротехника и энергообеспечение. 2016. № 1 (10). С. 51–63.

11. Седнин В.А., Гутковский А.А. Модернизация и автоматизация системы теплоснабжения. Опыт Беларуси // Энергосбережение. 2016. № 8. С. 52-59.

12. Романюк В.Н., Бобич А.А., Бубыр Т.В. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях // Энергия и менеджмент. 2013. № 6. С. 8-12.

13. Moroz D., Hruntovich, N., Hruntovich, N., et al. (2020). Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system. In E3S Web of Conferences. 2020. V. 220, p. 01076. EDP Sciences.

14. Hruntovich N.V., Kapanski A.A., Baczynski D., et al. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences. 2019. V. 124, p. 05060. EDP Sciences.

15. Грачева Е. И., Сафин А. Р., Садыков Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. №. 1. С. 48-52.

16. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Определение энергетического потенциала сжатого воздуха для оценки эффективности работы воздушно-аккумулирующей станции. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21(3-4). С. 27-37. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-27-37>.

17. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров // Техн. электродинамика. 2004. №. 3. С. 70-71.

Авторы публикации

Капанский Алексей Александрович – доцент факультета Энергетики, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь), г. Гомель, Республика Беларусь. Email: kapanski@mail.ru

References

1. Hakimyanov MI, Guzeev BV, Ryabishina LA. Methodological bases calculation of power consumption of electric drives booster and group pumping station. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2014;3(10):15–20.

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

3. Gumerova RK, Chernyakhovskiy VA. Modelling of electrical energy consumption of electrical drives in throttle and frequency regimes of control. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):96-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-96-106>.

4. Gruntovich NV, Kapansky AA. Assessment of the current state of energy efficiency of technological systems of water supply and wastewater disposal. *Energy efficiency*. 2016;8:20–24.

5. Kapanski A, Hruntovich N, Bakhur S, et al. (2020). Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks. In E3S Web of Conferences. 2020. V. 178. p. 01065. EDP Sciences.

6. Douglas A.P. et al. Risk due to load forecast uncertainty in short term power system planning. IEEE Transactions on Power Systems. 1998;13(4):1493–1499.

7. Douglas A.P. et al. *The impacts of temperature forecast uncertainty on Bayesian load forecasting*. IEEE Transactions on Power Systems. 1998;13(4):1507-1513.
9. Gruntovich NV, Kapansky AA. Prediction of energy efficiency indicators of technological wastewater disposal systems when changing the quality of treatment and wastewater volume. *Energy and management*. 2016;4:18–23.
8. Fedorov OV. *Expedition forecasting of power consumption*. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2017. C. 1-4.
10. Kapansky A.A. *Management of energy efficiency of pipeline drainage systems based on multifactor modeling of power consumption modes*. Agrotechnics and energy supply. 2016;1 (10):51–63.
11. Sednin VA, Gutkovsky AA. Modernization and automation of the heat supply system. Experience of Belarus. *Energy saving*. 2016;8:52-59.
12. Romanyuk VN., Bobich AA, Bubyry TV. Intensive energy saving in industrial heat technologies. *Energy and management*. 2013;6:8-12.
13. Moroz D, Hruntovich N, Hruntovich N, et al. (2020). *Regularities of the formation of structural fields of daily gas consumption of the regional gas supply system*. In E3S Web of Conferences. 2020;220:01076. EDP Sciences.
14. Hruntovich NV, Kapanski AA, Baczynski D, et al. (2019). *Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower*. In E3S Web of Conferences. 2019;124: 05060). EDP Sciences.
15. Gracheva EI, Safin AR, Sadykov RR. *Application of an analytical method for calculating the reliability of elements of power supply systems based on probabilistic models*. 2017;10(1):48-52.
16. Stepanov VS, Stepanova TB, Starikova NV. Evaluation the energy potential of compressed air for determining efficiency of air-accumulating electric. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3-4):27-37. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-27-37>.
17. Bobrov A.V. Increasing the energy efficiency of reciprocating compressors. *Tekhn. electrodynamics*. 2004;3:70–71.

Authors of the publication

Alexey A. Kapansky – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. Email: kapanski@mail.ru.

Получено

06.04.2021 г.

Отредактировано

13.04.2021 г.

Принято

21.04.2021 г.



ПРИМЕНЕНИЕ ABC И HML-МЕТОДИК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЗАПАСА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Белоглазов, А.Г. Русина, О.В. Фоменко, Д.А. Пехота, В.А. Фёдорова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
beloglazov@corp.nstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть применение ABC и HML-методик для прогнозирования объема аварийного запаса комплектующих основного электротехнического оборудования. Описать сущность методик, рассмотреть проблемы, сложность использования и предложить алгоритм построения нового метода формирования аварийного запаса на основе статистических данных электроэнергетического предприятия. МЕТОДЫ. Для выявления наиболее эффективного метода решения практических задач, возникающих на предприятии, был проведен численный эксперимент с использованием ABC и HML-анализов, который показал наибольшую эффективность первого метода. Для повышения точности прогнозирования по ABC-методу применялись результаты обработки статистических данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. Совокупность статистических данных и ABC-анализ показали высокую эффективность по краткосрочному прогнозированию запасов комплектующих электротехнического оборудования. Установлено, что HML-анализ обеспечивает меньшую точность прогнозирования необходимого запаса оборудования. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В рамках опытного применения данных методик под конкретную задачу прогнозирования запасов предприятия электротехнического комплекса наиболее перспективным является ABC-анализ, позволяющий оценить необходимый уровень аварийного запаса. HML-анализ не всегда позволяет определить уровень точности прогнозирования и планирования объемов необходимого электрооборудования.

Ключевые слова: аварийный запас; электрооборудование; ABC-анализ; параметр потока отказов.

Для цитирования: Белоглазов А.В., Русина А.Г., Фоменко О.В., Пехота Д.А., Фёдорова В.А. Применение ABC и HML-методик для определения и оптимизации запаса комплектующих электротехнического оборудования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С.103-115. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-103-115.

ABC AND HML-METHODS APPLICATION FOR DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF STOCK FOR ELECTRICAL EQUIPMENT ACCESSORY PARTS

AV. Beloglazov, AG. Rusina, OV. Fomenko, DA. Pekhota, VA. Fyodorova

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia
beloglazov@corp.nstu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To describe the use of ABC and HML-methods for predicting the volume of emergency stock for main electrical equipment accessory parts. To describe the content of the methods, consider the problems and complexity of use. To propose an algorithm constructing a new method for forming an emergency stock based on the statistical data of an electric power company. METHODS. Various practical tasks can arise in electric power company. We have determined the most effective method for solving them using a numerical experiment. The highest efficiency of the ABC method is shown. The results of statistical processing will help to improve forecast precision using the ABC-method. RESULTS. The complex of statistical data and ABC-analysis showed high efficiency in short-term forecasting of electrical equipment components emergency stocks. Authors found that HML-analysis provides less precision in predicting the requirement of equipment. CONCLUSION. The ABC method is

the most promising for implementation the specific task. The use of the method helps to accurately predict emergency stocks of company electrical equipment. The HML-method does not allow to precision planing the amount of required equipment.

Keywords: *emergency stock; electrical equipment; ABC-method; failure flow parameter.*

For citation: Beloglazov AV, Rusina AG, Fomenko OV, Pekhota D.A., Fyodorova V.A. ABC and HML-methods application for determination and optimization of stock for electrical equipment accessory parts. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):103-115. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-103-115.

Введение и литературный обзор

С позиций традиционного финансового менеджмента управление товарно-материальными запасами относится к управлению оборотным капиталом. Основными решениями при этом являются определение оптимального уровня затрат в оборотные активы и оптимального соотношения источников краткосрочного и долгосрочного финансирования для поддержания оптимального уровня оборотных средств. Оптимальный уровень оборотных средств, в том числе товарно-материальных запасов, определяется компромиссом между рентабельностью и риском, которого придерживается руководство компании. [1]

В финансовом менеджменте рассматриваются типовые производственные компании, в которых товарно-материальные запасы классифицируются, например, по таким группам как: «незавершенное производство», «в пути», «сырье и материалы», «готовая продукция». Существуют и другие классификации, например, по стоимости инвестиций, сделанных в каждую группу запасов; по уровню стабильности расходования групп запасов; по уровню критичности; по скорости устаревания и тому подобные. Методы, основанные на таких классификациях, могут быть реализованы в виде инструментов управления товарно-материальными запасами.

В отраслевых предприятиях энергетического сектора экономики существует своя специфика расхода товарно-материальных запасов. С одной стороны, на таких предприятиях действуют утвержденные нормы при заказе товарно-материальных запасов. С другой стороны, выполнение таких норм без должного анализа расхода запасных частей может приводить к заказу излишнего количества оборудования или к отсутствию необходимого оборудования, а также к дополнительным издержкам на хранение и транспортировку. Дополнительными факторами являются: географически распределенная структура предприятий энергетической отрасли, сложные погодные условия, тяжелая логистическая доступность и удаленность энергообъектов от складов и мест хранения. Поэтому стандартные методики, которые применяются на производственных и торговых предприятиях, не будут работать также эффективно на предприятиях, занимающихся обслуживанием энергетического оборудования. Для таких предприятий необходима разработка индивидуальной методики определения расхода товарно-материальных запасов. [2, 3, 4, 5]

В данной статье рассматривается разработка новой методики на примере определения необходимых складских запасов для производства ремонта электрооборудования в максимально короткие сроки. Новая методика сопряжена с необходимостью разработки новых методов оценки объема резерва, строящихся на минимизации расходов, связанных с этим резервом, и строящихся на теории управления запасами. [6]

Материалы и методы

В настоящее время существует 8 основных методов анализа ассортимента и запасов предприятия: ABC, XYZ, FSN/FNS/FMR, RFM, VED/VEN, QRS, HML, SDE. [7, 8, 9, 10] Для разработки новой методики были выбраны ABC и HML-анализы.

ABC-анализ в основном используется для изучения ассортимента предприятия и для управления запасами, при этом акцентируя внимание на самых многочисленных группах объектов. За внешней простотой у этого анализа есть недостатки, связанные с разделением данных независимо от их качественной характеристики. [11] Это может привести к сравнению групп товаров, состоящих из различных по своим свойствам объектов. Но для данного электрооборудования это несущественно. Также недостатком данного метода считают его одномерность, поскольку не всегда можно разделить корректно товары на 3 равные категории в связи с их востребованностью. Поэтому часто используют либо

двумерный *ABC*-анализ, либо совокупность нескольких анализов, при этом разделяя все запасы предприятия на несколько групп в зависимости от их совокупных характеристик. [12, 13]

HML-анализ является производной от *ABC*-анализа, но в отличие от него основан на соотношении цена/вес объекта за штуку. Элементы анализа делятся на три группы по уровню управляемости (точности прогнозирования, планирования) на три группы: *H (High)* – высокая точность; *M (Middle)* – средняя; *L (Low)* – низкая.

Однако в области электроэнергетики, в силу её специфики, использование таких методик не позволяет с высокой степенью вероятности спрогнозировать актуальный на нужное время, в зависимости от периода планирования, запас электрооборудования. Поэтому авторами предлагается использование статистических данных в совокупности с использованием существующих методик для устранения этого недостатка. Такой подход позволит определить актуальность аварийного запаса на планируемый период.

В начале определения запасов необходимо сформировать перечень оборудования, для которого необходим аварийный запас с учётом статистических данных по аварийности. Для конкретного оборудования определяются нормы расхода запасных частей по следующей формуле:

$$N_{\text{скл } i} = N_{\text{баз } i} \cdot K_{\text{корр } i}, \quad (1)$$

где $N_{\text{баз } i}$ – базовое значение нормы складского резерва для i -го оборудования, $K_{\text{корр } i}$ – корректирующий коэффициент, учитывающий обрачиваемость i -ой запасной части. Параметр $N_{\text{баз } i}$ определяется следующим образом:

$$N_{\text{баз } i} = m_i \cdot n_i \cdot \omega_i \cdot T_j, \quad (2)$$

где n_i – количество i -го оборудования, шт.; m_i – количество однотипных деталей в одной единице i -го оборудования, шт.; ω_i – параметр потока отказов, 1/год; T_j – период работы в зависимости от вида планирования: долгосрочное (5 лет), среднесрочное (3 года), краткосрочное (1 год), год.

Параметр потока отказов ω_i необходимо взять из справочных материалов или определить по статистическим данным (при их наличии) отказов оборудования с учётом условий эксплуатации за прошедший год или за несколько прошедших лет в зависимости от существующего объема статистических данных по годам:

а) для определения текущего параметра потока отказов необходимый объем данных должен составлять не менее 1000 случаев (либо период сбора информации должен составлять не менее 10 лет),

б) в процессе эксплуатации рекомендуется пересчет параметра потока отказов, с целью установления динамики изменения искомой величины, рекомендуемый период обновления информации – 1 раз в год. Значения параметра потока отказов ω_i можно взять из руководящего документа РД 34.20.574.¹

Определение корректирующего коэффициента нормы складского резерва для i -го оборудования $K_{\text{корр } i}$ производится на основе *ABC* и *HML*-анализов. *ABC*-анализ целесообразно проводить при рассмотрении денежных показателей оборота запасных частей. [14] *HML*-анализ целесообразно проводить по итогам отчетного финансового периода — года, что позволит корректно оценить эффективность производственных отделений (ПО). Совместный *ABC-HML*-анализ целесообразно проводить при совмещении условий проведения *ABC*-анализа и *HML*-анализа. [15]

На основе оборотно-сальдовой ведомости можно формировать две таблицы:

- в денежном измерении,
- в количественном измерении.

Для каждого вида анализа определяется соответствующий корректирующий

¹ РД 34.20.574 «Указания по применению показателей надёжности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817220.htm>

коэффициент: *ABC*-анализ – $K_{\text{корр } ABC i}$ и *HML*-анализ – $K_{\text{корр } HML i}$. Запасы элементов оборудования по *ABC*-анализу классифицируются на 3 группы (таблица 1).

Таблица 1

Значения корректирующего коэффициента по <i>ABC</i> -анализу			
Группа	Доля в общей стоимости запасов	Доля в общем количестве	Корректирующий коэффициент $K_{\text{корр } ABC i}$, о.е.
A	До 80%	Небольшая	1
B	До 15%	Средняя	0,8
C	До 5%	Большая	0,6

Принадлежность элемента оборудования запаса к определённой группе задаёт величину корректирующего коэффициента. Запасы элементов оборудования *HML*-анализа классифицируются по уровню управляемости на 3 группы (таблица 2).

Таблица 2

Значения корректирующего коэффициента по <i>HML</i> -анализу		
Группа	Уровень управляемости группы	Корректирующий коэффициент $K_{\text{корр } HML i}$, о.е.
H	Высокий	1
M	Средний	0,8
L	Низкий	0,6

Совокупность же *ABC* и *HML*-анализов позволяет представить совместную *ABC* и *HML* классификацию элементов с единых позиций: от наиболее дорогих и легко управляемых до дешёвых и одновременно непредсказуемых. Запасы элементов оборудования классифицируются на 9 групп: *AH, BH, CH, AM, BM, CM, AL, BL, CL*.

Позиции, попавшие в группы *AH, AM, BH*, лежащие выше диагонали таблицы, считаются важными по стоимости и хорошо управляемыми. Этим позициям присваивается наибольший корректирующий коэффициент (1).

Позиции, попавшие в группы *AL, BM, CH*, лежащие на диагонали таблицы, считаются средними по стоимости и удовлетворительно управляемыми. Этим позициям присваивается средний корректирующий коэффициент (0,8).

Позиции, попавшие в группы *BL, CM, CL*, лежащие ниже диагонали таблицы, считаются незначимыми по стоимости и плохо управляемыми. Этим позициям присваивается наименьший корректирующий коэффициент (0,6).

Таблица 3

Классификационная таблица <i>ABC-HML</i> -анализа			
Группа	A	B	C
H	<i>AH</i> (1)	<i>BH</i> (1)	<i>CH</i> (0,8)
M	<i>AM</i> (1)	<i>BM</i> (0,8)	<i>CM</i> (0,6)
L	<i>AL</i> (0,8)	<i>BL</i> (0,6)	<i>CL</i> (0,6)

Принадлежность элемента оборудования запаса к определённой группе определяет величину корректирующего коэффициента. Статистические результаты *ABC* и *HML*-анализов рекомендуется компенсировать экспертными поправками для нейтрализации выбросов в случайных выборках. Экспертные поправки выставляются в виде маркеров, которые сигнализируют о том, что по некоторым позициям запасных частей и материалов нужно учитывать какие-либо особенности. Количество разных типов маркеров может меняться по необходимости, важность для отдельных позиций запасных частей по каждому производственному отделению определяется индивидуально. Рекомендуется использовать следующие маркеры: M1 – долгая поставка, M2 – есть невыполненные поставки в текущем году. Допускается введение дополнительных маркеров, а также замена рекомендуемых маркеров другими, если в этом есть необходимость. Список маркеров должен быть единым во всей компании, применяющей методику. Алгоритм методики расчёта норм расхода аварийного запаса запасных частей ПО представлен на рис. 1.

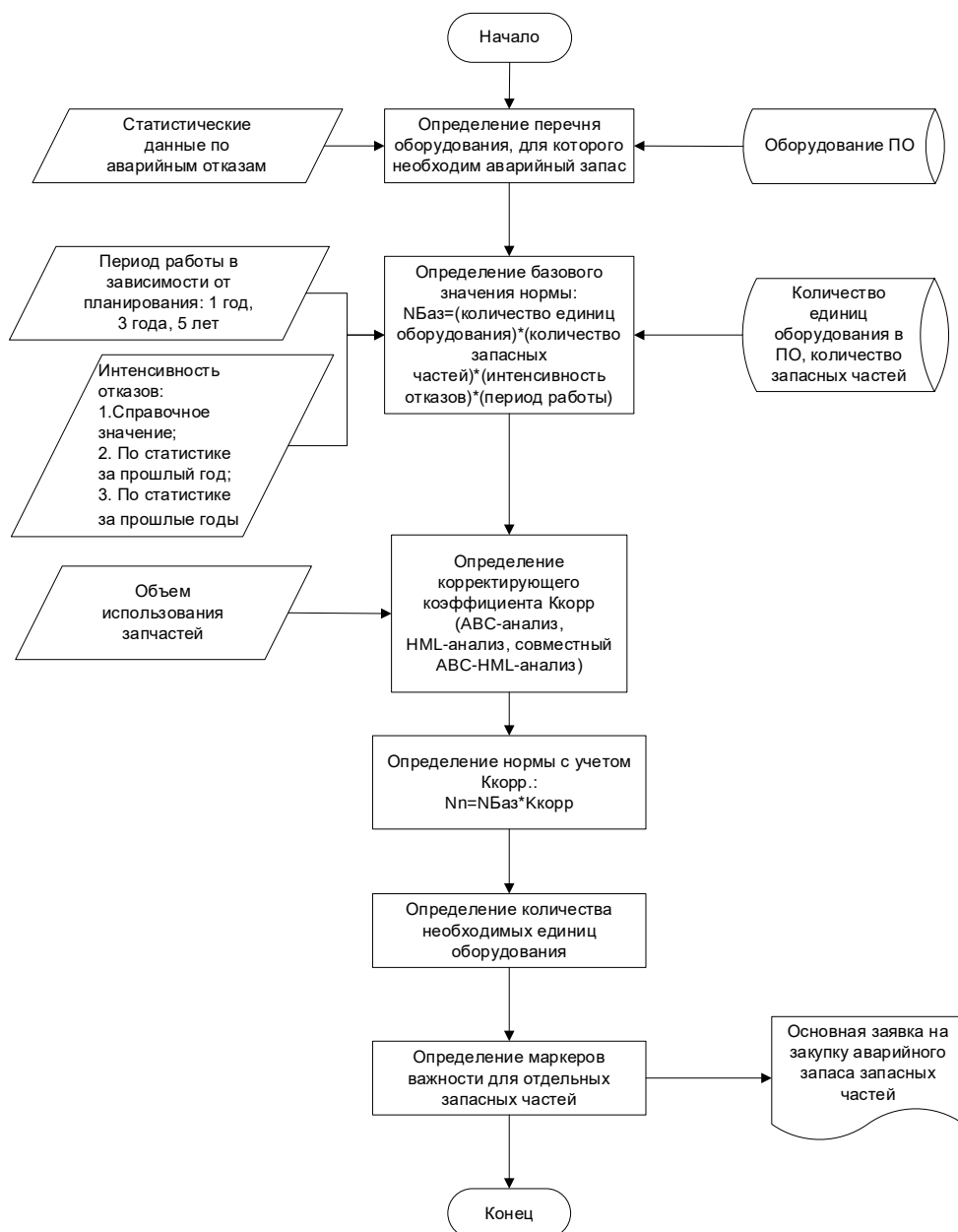


Рис.1 Алгоритм расчёта норм расхода запасных частей ПО

Fig. 1 Algorithm for calculating the consumption rates of spare parts for

Определение нормативов расхода аварийного складского запаса (оборудования, комплектующих изделий) основного энергетического оборудования проведено на основании следующих исходных данных. Взято Общество, включающее 2 производственных отделения. Имеется оборотно-сальдовая ведомость за 9 месяцев планового года. Количество элементов оборудования в ведомости: 13 шт. Для электрооборудования «трансформатор силовой ТМН-6300/35» из всего списка элементов (13 шт.) запасной частью является элемент «зажим контактный». Количество единиц электрооборудования «трансформатор силовой ТМН-6300/35» для определения необходимого запаса частей: $n_1 = 100$ шт. Количество однотипных элементов «зажим контактный» в электрооборудовании «трансформатор силовой ТМН-6300/35»: $m_1 = 3$ шт. Параметр потока отказов (из справочных данных): $\omega_1 = 0,007$ 1/год. Период работы: $T_1 = 1$ год (краткосрочное планирование). Базовая норма складского запаса определяется согласно формуле 2:

$$N_{\text{баз } 1} = m_1 \cdot n_1 \cdot \omega_1 \cdot T_1 = 3 \cdot 100 \cdot 0,007 \cdot 1 = 2,1 \text{ шт.}$$

Для расчёта корректирующего коэффициента в качестве источника исходных данных

для ABC и HML-анализа используется оборотно-сальдовая ведомость за анализируемый период (квартал, полугодие, год - в зависимости от выбранного горизонта планирования). На основе этой ведомости формируются две таблицы, содержащие данные по конкретному субсчету, сетевому участку, либо по их совокупности, в зависимости от необходимого уровня анализа:

- в денежном измерении (табл. 4),
- в количественном измерении (табл. 5).

Таблица 4

Выборка из оборотно-сальдовой ведомости за период (в руб.)

Наименование элемента оборудования	Сальдо на начало периода		Оборот за период		Сальдо на конец периода	
	Дебет	Кредит	Дебет	Кредит	Дебет	Кредит
1	2	3	4	5	6	7
Зажим контактный			42000,00	42000,00		
Втулка изоляционная			110302,09	110302,09		
Блок питания			30101,60	30101,60		
Подшипник			15067,79	15067,79		
Блок коммутации			147325,50	147325,50		
Модуль процессорный			182765,72	182765,72		
Выключатель автоматический			130699,73	130699,73		
Фотодатчик	4997,72					
Втулка с кольцам			72172,58	72172,58		
Датчик температуры			64814,50	64814,50		
Батарея аккумуляторная NiMH			31331,20	31331,20		
Втулка с кольцами			94441,67	94441,67		
Предохранитель			2847,48	2847,48		

Таблица 5

Выборка из оборотно-сальдовой ведомости за период (в шт.)

Наименование элемента оборудования	Сальдо на начало периода		Оборот за период		Сальдо на конец периода	
	Дебет	Кредит	Дебет	Кредит	Дебет	Кредит
1	2	3	4	5	6	7
Зажим контактный			2	2		
Втулка изоляционная			3	3		
Блок питания			8	8		
Подшипник			1	1		
Блок коммутации			1	1		
Модуль процессорный			2	2		
Выключатель автоматический			4	4		
Фотодатчик	4			4		
Втулка с кольцам			1	1		
Датчик температуры			1	1		
Батарея аккумуляторная NiMH			1	1		
Втулка с кольцами			1	1		
Предохранитель			6	6		

Количество строк в таблицах 4 и 5 зависит от объема конкретной выборки. В дальнейшем на основании этих таблиц необходимо провести ABC и HML-анализ и в денежном, и в количественном измерении.

ABC-анализ проводится по данным 1 и 5 столбцов таблицы 4. По этим данным

формируется 3 первых столбца таблицы 6. Необходимо посчитать сумму столбца «Кредит», в данном примере он составил 928867,58 рублей. В четвертом столбце таблицы 6 рассчитана доля в сумме итога каждой позиции в процентах. После этого таблица сортируется по убыванию доли суммы наименования.

Таблица 6

Результат сортировки			
№ п/п	Наименование	Кредит	Доля
1	2	3	4
6	Модуль процессорный	182765,72	19,68
5	Блок коммутации	147325,50	15,86
7	Выключатель автоматический	130699,73	14,07
2	Втулка изоляционная	110302,09	11,87
12	Втулка с кольцами	94441,67	10,17
9	Втулка с кольцам	72172,58	7,77
10	Датчик температуры	64814,50	6,98
1	Зажим контактный	42000,00	4,52
11	Батарея аккумуляторная NiMH	31331,20	3,37
3	Блок питания	30101,60	3,24
4	Подшипник	15067,79	1,62
8	Фотодатчик	4997,72	0,54
13	Предохранитель	2847,48	0,31
	Итого:	928867,58	100

К таблице 6 добавляются столбцы 5 - «Нарастающий итог», 6 - «Группа», 7 - «Группа, %», и формируется окончательный вид таблицы ABC-анализа, представленного в таблице 7.

Столбец 5 «Нарастающий итог» формируется следующим образом - первое значение столбца 5 совпадает с первым значением столбца 4. Со второго значения - к предыдущему значению столбца 5 добавляется текущее значение столбца «Доля», далее таким же образом с накопительным эффектом до конца позиций таблицы.

В столбце 6 «Группа» значение устанавливается в зависимости от текущего значения столбца 5. Если значение столбца 5 попадает в интервал:

- 0...80%, то устанавливается значение «А»,
- 81...95%, то устанавливается значение «В»,
- 96...100%, то устанавливается значение «С».

Таблица 7

Результат ABC-анализа						
№ п/п	Наименование	Кредит	Доля	Нараст. итог	Группа	Группа, %
1	2	3	4	5	6	7
6	Модуль процессорный	182765,72	19,68	19,68	А	80
5	Блок коммутации	147325,50	15,86	35,54	А	80
7	Выключатель автоматический	130699,73	14,07	49,61	А	80
2	Втулка изоляционная	110302,09	11,87	61,48	А	80
12	Втулка с кольцами	94441,67	10,17	71,65	А	80
9	Втулка с кольцам	72172,58	7,77	79,42	А	80
10	Датчик температуры	64814,50	6,98	86,40	В	15
1	Зажим контактный	42000,00	4,52	90,92	В	15
11	Батарея аккумуляторная NiMH	31331,20	3,37	94,29	В	15
3	Блок питания	30101,60	3,24	97,53	С	5
4	Подшипник	15067,79	1,62	99,16	С	5
8	Фотодатчик	4997,72	0,54	99,69	С	5
13	Предохранитель	2847,48	0,31	100,00	С	5

При необходимости границы интервалов подлежат экспертной оценке и корректировке. Как видно из таблицы 7, первые 6 элементов наиболее дорогого оборудования вошли в группу А, дающую 80 % общей его стоимости. Ещё 3 элемента оборудования средней стоимости дали 15 % общей стоимости. На оставшиеся 4 элемента пришлось только 5 % общей стоимости. АВС-анализ выполнен.

В качестве источника исходных данных для HML-анализа, как и для АВС-анализа, используется оборотно-сальдовая ведомость. В качестве примера в таблице 8 представлена итоговая выборка по сетевым участкам отдельного ПО (в рублях).

Таблица 8

Выборка по сетевым участкам

Сетевые участки C_j	Сальдо на начало периода		Оборот за период		Сальдо на конец периода	
	Дебет1	Кредит1	Дебет2	Кредит2	Дебет3	Кредит3
1	2	3	4	5	6	7
C_1	176286	0	347423	422716	100993	0
C_2	0	0	54618	40221	14396	0
C_3	75122	0	116691	191813	0	0
C_4	0	0	304474	304474	0	0
C_5	4998	0	933419	938417	0	0
C_6	0	0	22196	22196	0	0
C_7	0	0	525266	422962	102304	0
C_8	2503186	0	1185868	286080	3402974	0
C_9	58728	0	851623	770307	140044	0
C_{10}	37921	0	44821	80659	2083	0
C_{11}	0	0	141699	22199	119500	0

Для каждой строки j таблицы 8 строится система признаков $P(i,j)$, $i = 1 - 6$, по следующим правилам:

1. Если значение в столбце 6 «Дебет3» равно 0, то значению признака $P(1,j)$ присваивается значение «1»: $P(1,j) = 1$, иначе $P(1,j) = 0$. $P(1,j) = 1$ — оценка «Отлично»: все заказанные запасы использованы. (При условии «Движение было»: $6 - \text{«Кредит2»} > 0$. (Либо $2 - \text{«Дебет1»} > 0$ или $4 - \text{«Дебет2»} > 0$)).

2. Если значение в столбце 2 «Дебет1» равно 0, то значению признака $P(2,j)$ присваивается значение «0»: $P(2,j) = 0$, иначе $P(2,j) = 1$. $P(2,j) = 0$ — оценка «Плохо»: планирование на год плохое.

3. Если значение в столбце 4 «Дебет2» равно 0, то значению признака $P(3,j)$ присваивается значение «0»: $P(3,j) = 0$, иначе $P(3,j) = 1$. $P(3,j) = 0$ — оценка «Плохо»: текущее планирование на месяц плохое.

4. Если значение в столбце 5 «Кредит2» равно 0, то значению признака $P(4,j)$ присваивается значение «0»: $P(4,j) = 0$, иначе $P(4,j) = 1$. $P(4,j) = 0$ — оценка «Плохо»: заказанные запасы не использованы (если запасы ранее поступали).

5. Если значение в столбце 5 «Кредит2» равно 0, то значению признака $P(5,j)$ присваивается значение «1»: $P(5,j) = 1$, иначе $P(5,j) = 0$. $P(5,j) = 1$ — оценка «Отлично»: запланированные в начале и внутри периода запасы полностью использованы.

6. Если значение в столбце 6 «Дебет3» значительно больше значения в столбце 5 «Кредит2», то значению признака $P(6,j)$ присваивается значение «0»: $P(6,j) = 0$, иначе $P(6,j) = 1$. $P(6,j) = 0$ — оценка «Плохо»: использовано значительно меньше, чем поступило.

Набор правил 1 – 6 может корректироваться в зависимости от целей анализа. Таблица 8 дополняется столбцами 14 — «Рейтинг» и 15 — «Группа HML». Элементы столбца 14 — «Рейтинг» рассчитывается как сумма по строке столбцов.

$P1 - P6$ (8 – 13): «Рейтинг j » = $P(1,j) + P(2,j) + \dots + P(6,j)$. Столбец 15 — «Группа HML» формируется следующим образом:

- Если «Рейтинг» = 6, то сетевой участок попадает в группу «H» — High.
- Если «Рейтинг» = 5, то сетевой участок попадает в группу «M» — Middle.
- Если «Рейтинг» = 4 и менее, то сетевой участок попадает в группу «L» — Low.

Условия попадания в группу могут корректироваться.

Таблица 9

Результат HML-анализа								
Сетевые участки C_j	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Рейтинг	Группа HML
1	8	9	10	11	12	13	14	15
C_1	0	1	1	1	0	1	4	L
C_2	0	0	1	1	0	1	3	L
C_3	1	1	1	1	1	1	6	H
C_4	1	0	1	1	1	1	5	M
C_5	1	1	1	1	1	1	6	H
C_6	1	0	1	1	1	1	5	M
C_7	0	0	1	1	0	1	3	L
C_8	0	1	1	1	0	0	3	L
C_9	0	1	1	1	0	1	4	L
C_{10}	0	1	1	1	0	1	4	L
C_{11}	0	0	1	1	0	0	2	L

HML-анализ выполнен.

Для совокупного ABC-HML-анализа в качестве исходных данных, как и выше, используется оборотно-сальдовая ведомость. В качестве примера в таблице 10 представлена итоговая выборка по сетевым участкам отдельного ПО (в руб.).

Таблица 10

Выборка по сетевым участкам						
Сетевые участки C_j	Сальдо на начало периода		Оборот за период		Сальдо на конец периода	
	Дебет1	Кредит1	Дебет2	Кредит2	Дебет3	Кредит3
1	2	3	4	5	6	7
C_1	176286	0	347423	422716	100993	0
C_2	0	0	54618	40221	14396	0
C_3	75122	0	116691	191813	0	0
C_4	0	0	304474	304474	0	0
C_5	4998	0	933419	938417	0	0
C_6	0	0	22196	22196	0	0
C_7	0	0	525266	422962	102304	0
C_8	2503186	0	1185868	286080	3402974	0
C_9	58728	0	851623	770307	140044	0
C_{10}	37921	0	44821	80659	2083	0
C_{11}	0	0	141699	22199	119500	0

В данном случае необходимо сделать ABC-анализ по аналогии с предыдущим примером для данных 11-ти сетевых участков. Результаты данного анализа представлены в столбце 3 таблицы 11 «ABC». Результаты HML-анализа необходимо перенести из таблицы 9 в столбец 4 таблицы 11. В столбце 5 формируется сцепка столбцов 3 и 4.

Таблица 11

Результат ABC-HML-анализа				
№ в ОСВ	Сетевые участки C_j	ABC	HML	Сцепка
1	2	3	4	5
1	C_1	A	L	AL
2	C_2	C	L	CL
3	C_3	C	H	CH
4	C_4	B	M	BM
5	C_5	A	H	AH
6	C_6	C	M	CM
7	C_7	A	L	AL
8	C_8	B	L	BL

Результат ABC-HML-анализа

№ в ОСВ	Сетевые участки C_j	ABC	HML	Сцепка
9	C_9	A	L	AL
10	C_{10}	C	L	CL
11	C_{11}	C	L	CL

Позиции, попавшие в группы *АН*, *АМ*, *ВН*, лежащие выше диагонали таблицы, считаются важными по стоимости и хорошо управляемыми. Позиции, попавшие в группы *АL*, *ВМ*, *СН*, лежащие на диагонали таблицы, считаются средними по стоимости и удовлетворительно управляемыми. Позиции, попавшие в группы *ВL*, *СМ*, *СL*, лежащие ниже диагонали таблицы, считаются незначимыми по стоимости и плохо управляемыми.

Далее необходимо рассчитать количества позиций в полях классификации и занести этот результат в таблицу 12. В таблице 12 заметно, что отличный результаты показывает только один сетевой участок (1+0+0), средние результаты показывают 5 участков (3+1+1), плохие результаты показывают 5 участков (1+1+3).

Таблица 12

Количество элементов в классификации ABC-HML-анализа

	A	B	C	Итог по строке
<i>H</i>	1	0	1	2
<i>M</i>	0	1	1	2
<i>L</i>	3	1	3	7
Итог по столбцам	4	2	5	11

На основании таблицы 12 можно сделать выводы:

1. Только одна позиция (C_9) может считаться важной по стоимости и хорошо управляемой (*АН*). Ей присваивается поправочный коэффициент 1.

2. Пять позиций, попавших в группы *АL*, *ВМ*, *СН*, лежащие на диагонали таблицы, считаются средними по стоимости и удовлетворительно управляемыми. Им присваивается поправочный коэффициент 0,8.

3. Пять позиций, попавших в группы *ВL*, *СМ*, *СL*, лежащие ниже диагонали таблицы, считаются незначимыми по стоимости и плохо управляемыми. Им присваивается поправочный коэффициент 0,6.

ABC-HML-анализ выполнен.

Для определения корректирующего коэффициента к базовой норме элемента «зажим контактный» используем результаты ABC-анализа. Тогда согласно таблице 7 рассматриваемый элемент находится в группе В, следовательно, корректирующий коэффициент $K_{\text{корр ABC}} = 0,8$ о.е. Норма расхода элемента «зажим контактный» электрооборудования «трансформатор силовой ТМН-6300/35» N_{n1} будет равна согласно формуле 1:

$$N_{n1} = N_{\text{баз1}} \cdot K_{\text{корр ABC}} = 2,1 \cdot 0,8 = 1,68 \text{ шт.}$$

Необходимо округлить в большую сторону: $N_{n1} = 2$ шт. Далее при необходимости можно задать типовые маркеры:

- M1 — долгая поставка,
- M2 — есть невыполненные поставки в текущем году,
- Mл — дополнительный маркер (при необходимости).

Вывод по результатам расчёта:

- у ПО1 потребность к закупке запасных частей «зажим контактный» в количестве 2 шт., маркер M1 не отмечен — нет задержек с поставками, маркер M2 не отмечен — нет невыполненных заявок в текущем году, следовательно, для ПО1 нужно закупить запасную часть «зажим контактный» в количестве 2 шт.,

- итого по Обществу при отсутствии других потребностей в данном элементе необходимо закупить запасную часть «зажим контактный» в количестве 2 шт.

Результаты и обсуждения

Использование данных методик показало, что в период с 2020 по 2021 год ABC-методика качественно подходит для определения необходимого объёма запасов

электрооборудования при краткосрочном прогнозировании (на 1 год).

HML-методика не подходит для определения аварийного запаса, а скорее является методом оценки качества прогнозирования аварийного запаса отдельных производственных объединений, с целью выявления наиболее успешных прогнозов.

Данная статья легла в основу документа «Методика определения нормативов текущего и страхового (аварийного) запаса запасных частей (оборудования, комплектующих изделий) и материалов на проведение технического обслуживания и ремонта основного энергетического оборудования». В методике приведены организационно-методологические правила определения нормативов расхода, формализации порядка и условий планирования и управления текущим и страховым (аварийным) запасом для проведения технического обслуживания и ремонта основного энергетического оборудования ДО ПАО «Газпром нефть».

ABC-методика применима не только для определения аварийного запаса, но и для запаса на техническое обслуживание и ремонт электрооборудования. Метод позволяет проводить качественный постоянный анализ и не считать нормативы линейно от количества оборудования.

Выводы

По мнению авторов, наиболее перспективной методикой по оценке норм аварийного запаса производственного объединения электротехнического комплекса является *ABC*-методика, которая позволяет с достаточной точностью оценить необходимый уровень аварийного запаса. При этом *HLM*-методика даёт слишком большую ошибку в определении уровня управляемости (точности прогнозирования, планирования) объёмов необходимого электрооборудования для отдельных подразделений предприятия. Возможность применения *HLM*-методики для решения подобного класса задач в области электроэнергетики является темой для дальнейших независимых исследований.

Литература

1. Макаркин Н.П. Экономическая оптимизация количества запасных элементов технических систем с учетом фактора надежности // Вестник Мордовского университета. 2016. № 4. С. 448-461.
2. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Федоров О.В. Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей республики Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 11-12. С. 46-55.
3. Буторин В.А., Царев И.Б., Буторин Д.В. Расчет ущерба предприятий по обслуживанию сельских распределительных сетей, вызванного дефицитом аварийного резерва запасных элементов // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 12. С. 60-62.
4. Буторин В.А., Царев И.Б., Буторин Д.В. Затраты, связанные с омертвлением денежных средств при создании ремонтными предприятиями резерва запасных частей // Вестник Челябинской Государственной Агроинженерной Академии. 2014. № 1. С. 14-17.
5. Волков С.В., Рыбаков Л.М. Обоснование комплектования аварийным запасом элементов, аппаратов и оборудования распределительной сети 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 3-4. С. 87-90.
6. Буторин Д.В. Анализ методов расчета аварийного резерва в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи. 4 Всероссийская научно-практическая онлайн конференции молодых ученых. 2013. С. 91-93.
7. Шевченко А.А., Немова А.М., Селиванов Е.А., и др. ABC-анализ и XYZ-анализ, как инструменты обеспечения экономической безопасности предприятия // Студенческий Вестник. 2019. № 3-2(53). С. 44-47.
8. Шегай Д.В., Привалова Е.А. ABC-анализ и XYZ-анализ в логистике // Проблемы управления – 2017. 25 Всероссийская студенческая конференции. М.: 2017. С. 139-144.
9. Быстрицкая Я.М. Логистические методы анализа и управления ассортиментом предприятий розничной торговли // Управленец. 2015. № 1(53). С. 69-73.
10. Borodiyenko O., Malykhina Ya, Kalenskyi A., et al. Economic, psychological and pedagogical preconditions of implementation of result-based management // Financial and credit activity: problems and prospect, 2020. pp 535-546.
11. Воронов В.И. ABC-анализ [Электронный ресурс]. <https://center-yf.ru/data/Marketologu/ABC-analiz.php> Режим доступа: (дата обращения 01.04.2021).
12. Zeyu Zhang, Kevin W. Li, Xiaolei Guo, Jun Huang. A probability approach to multiple criteria ABC analysis with misclassification tolerance // International Journal of Production Economics, 2020. pp 1-44.

13. Чуваев А.В. Адаптация методики ABC к анализу производственных процессов промышленных предприятий // Актуальные проблемы социально-экономического развития Российской Федерации. 1 межрегиональная научная конференция аспирантов, посвященная 20-летию ААЭП. 2013. С. 73-76.

14. Usman Ali, Bashir Salah, Khawar Naeem, et al. Improved MRO Inventory Management System in Oil and Gas Company: Increased Service Level and Reduced Average Inventory Investment // Sustainability, 2020. pp 1-19.

15. Mitra Shibamay, Pattanayak Sujit Kumar, Bhowmik Papiya. Inventory control using ABC and HLM-analysis – a case study on a manufacturing industry // International Journal of Mechanical and Industrial Engineering: V. 3: Iss. 4, Article 14, 2014. pp 283-288.

Авторы публикации

Белоглазов Алексей Владимирович – канд. техн. наук, декан факультета Энергетики, Новосибирский государственный технический университет.

Русина Анастасия Георгиевна – д-р техн. наук, заведующая кафедрой Электрических станций, Новосибирский государственный технический университет.

Фоменко Олег Витальевич – руководитель направления по внедрению новых методов обслуживания и новых технологий ООО «Ноябрьскэнергогаз».

Пехота Дмитрий Андреевич – магистрант, Новосибирский государственный технический университет.

Фёдорова Виктория Александровна – магистрант, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Makarkin NP. Economic optimization of the number of spare elements of technical systems regarding the reliability factor. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2016; 4: 448-461.

2. Volotkovskaya NS, Semenov AS, Fedorov OV. Analysis of structure and technical condition of western electric networks of the republic of Sakha (Yakutia). *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 11-12: 46-55.

3. Butorin VA, Tsarev IB, Butorin DV. Calculation of damages service facility rural distribution network caused by a deficiency emergency reserve replacement parts. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2013; 12: 60-62.

4. Butorin VA, Tsarev IB, Butorin DV. The costs caused by losses of funds when repair companies reserve spare parts. *Vestnik Chelyabinskoy Gosudarstvennoy Agroinzhenernoy Akademii*. 2014; 1: 14-17.

5. Volkov SV, Rybakov LM. The substantiation of acquisition by an emergency reserve members, vehicles and equipment of a distributive network (grid) 10 kV. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2004; 3-4: 87-90.

6. Butorin DV. *Analiz metodov rascheta avariynogo rezerva v sisteme elektrosnabzheniya sel'skokhozyaystvennykh potrebiteley. Razvitiye nauchnoy, tvorcheskoy i innovatsionnoy deyatel'nosti molodezhi*. 4 Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya onlayn konferentsii molodykh uchenykh. 2013:91-93.

7. Shevchenko AA, Nemova AM, Selivanov EA, et al. ABC-analiz i XYZ-analiz, kak instrumenty obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya. *Studencheskiy Vestnik*. 2019;3-2(53): 44-47.

8. Shegay DV, Privalova EA. ABC-analiz i XYZ-analiz v logistike. *Problemy upravleniya – 2017. 25 Vserossiyskaya studencheskaya konferentsii*. M.: 2017: 139-144.

9. Bystritskaya YM. Logistic methods of analysis and management of retailers' trade list. *Upravlenets*. 2015; 1(53): 69-73.

10. Borodiyenko O, Malykhina Ya, Kalenskiy A, et al. Economic, psychological and pedagogical preconditions of implementation of result-based management. *Financial and credit activity: problems and prospect*. 2020. pp. 535-546.

11. Voronov VI. ABC-analiz [Electronic resource]. <https://center-yf.ru/data/Marketologu/ABC-analiz.php>. Accessed to: 01.04.2021.

12. Zeyu Zhang, Kevin W. Li, Xiaolei Guo, Jun Huang. A probability approach to multiple criteria ABC analysis with misclassification tolerance. *International Journal of Production Economics*, 2020. pp 1-44.

13. Chuvaev AV. *Adaptatsiya metodiki ABC k analizu proizvodstvennykh protsessov promyshlennykh predpriyatiy*. Aktual'nye problemy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii. 1 mezhhregional'naya nauchnaya konferentsiya aspirantov, posvyashchennaya 20-letiyu AAEP. 2013:73-76.

14. Usman Ali, Bashir Salah, Khawar Naeem, et al. Improved MRO Inventory Management System in Oil and Gas Company: Increased Service Level and Reduced Average Inventory Investment. *Sustainability*, 2020. pp 1-19.

15. Mitra Shibamay, Pattanayak Sujit Kumar, Bhowmik Papiya. Inventory control using ABC and HLM-analysis – a case study on a manufacturing industry. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*: 2014;3(4):283-288.

Authors of the publication

Aleksey V. Beloglazov – Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia. Email: beloglazov@corp.nstu.ru.

Anastasiya G. Rusina – Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia.

Oleg V. Fomenko – ООО «Noyabrskenergoneft», Russia.

Dmitriy A. Pekhota – Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia.

Viktoriya A. Fyodorova – Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia.

Получено

15.04.2021 г.

Отредактировано

12.05.2021 г.

Принято

24.05.2021 г.



СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫМ АСИНХРОННЫМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В.Н. Мещеряков¹, Д.С. Сибирцев¹, С. Валтчев³, Е.И. Грачева²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Новый Лиссабонский университет; ТУ София и БФУ Болгария

mesherek@stu.lipetsk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В регулируемых приводах переменного тока, применяемых на механизмах непрерывного действия, к которым относятся конвейеры, транспортеры, краны, наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с фазным ротором, управляемые в основном по цепи ротора с помощью различных регуляторов с низкими показателями энергоэффективности. Для повышения энергоэффективности электропривода на основе АДФР предлагается разработать систему управления, сочетающую принципы частотного управления двигателем по цепи статора и питание цепи ротора постоянным напряжением, что позволяет считать электропривод синхронизированным. МЕТОДЫ. Наличие в преобразователе частоты звена постоянного тока дает принципиальную возможность включения обмотки ротора последовательно в это звено. Однако при этом для обеспечения частотного принципа регулирования выходных характеристик электропривода потребуется регулирование выпрямленного тока на входе инвертора и, соответственно в обмотках ротора, что потребует существенного изменения стандартной системы управления преобразователем частоты. Предложено использование дополнительного регулируемого коммутатора в звене постоянного тока. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследование предложенной нестандартной системы управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом выполнено методом имитационного моделирования в пакете программ Matlab Simulink. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработана и исследована на компьютерной модели система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом. Предложена система коррекции, позволяющая в пусковом режиме поддерживать постоянную величину угла нагрузки. Скалярная система релейного частотного управления электроприводом дополнена векторной коррекцией переменных, что позволяет непрерывно обеспечивать необходимую взаимную ориентацию векторов тока статора и потока сцепления ротора.

Ключевые слова: асинхронный синхронизированный электропривод; асинхронный двигатель с фазным ротором; автономный инвертор тока; частотное управление; коррекция; управляемый транзисторный коммутатор; компьютерное моделирование; преобразователь частоты; релейный регулятор тока.

Информация о поддержке: Статья написана при поддержке гранта РФФИ №19-48-48001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Для цитирования: 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.

CONTROL SYSTEM FOR A FREQUENCY SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

VN. Meshcheryakov¹, DS. Sibirtsev¹, S. Valtchev³, EI. Gracheva²

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Energy University, Kazan, Russia

³New University of Lisbon; TU Sofia and BFU Bulgaria

mesherek@stu.lipetsk.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In controlled AC drives used on continuous-action mechanisms, which include conveyors, conveyors, cranes, the most widespread are asynchronous motors with a phase rotor, controlled mainly along the rotor circuit using various regulators with low energy efficiency. To improve the energy efficiency of an electric drive based on ADFR, it is proposed to develop a control system that combines the principles of frequency control of the motor along the stator circuit and powering the rotor circuit with constant voltage, which allows the electric drive to be considered synchronized. *METHODS.* The presence of a DC link in the frequency converter makes it possible in principle to connect the rotor winding in series to this link. However, in order to ensure the frequency principle of regulating the output characteristics of the electric drive, it will be necessary to regulate the rectified current at the input of the inverter and, accordingly, in the rotor windings, which will require a significant change in the standard control system of the frequency converter. The use of an additional adjustable switch in the DC link is proposed. *RESULTS.* The study of the proposed non-standard control system for a frequency asynchronous synchronized electric drive was carried out by the method of simulation modeling in the Matlab Simulink software package. *CONCLUSION.* A control system for a frequency asynchronous synchronized electric drive has been developed and investigated on a computer model. A correction system is proposed that allows maintaining a constant value of the load angle in the starting mode. The scalar system of relay frequency control of the electric drive is supplemented with vector correction of the variables, which makes it possible to continuously provide the necessary mutual orientation of the stator current vectors and the rotor flux linkage.

Keywords: asynchronous synchronized electric drive; asynchronous motor with a wound rotor; autonomous current inverter; frequency control; correction, controlled transistor switch; computer simulation; frequency converter, relay current regulator.

Acknowledgments: The paper was powered by research grant RFBR 19-48-480001 «Development, investigation and optimization of energy-saving electrical and electrically driven automated systems for plasma, electrometal slag and induction technologies and units».

For citation: 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.

Введение

В настоящее время электрические машины являются потребителями порядка 75% всей производимой в мире электроэнергии. Применение электропривода в промышленности непрерывно растет. В большей части приводов используется асинхронный двигатель. Однако, проанализировав научно-техническую литературу, можно сделать вывод о том, что при эксплуатации асинхронного двигателя в течении года потери в нем сопоставимы с половиной стоимости самого АД [1]. А современные тенденции развития электроэнергетики, связанные с применением энергосберегающих технологий, напрямую зависят от эффективности работы электроприводов. Доля регулируемых приводов в России не превышает 15-20% от всего объема, что является существенной проблемой на пути достижения цели повышения эффективности использования энергоресурсов. Таким образом, приоритетным направлением является внедрение высокоэффективных, производительных систем регулируемого электропривода [2].

Главным аспектом в процессе модернизации электрооборудования является разработка систем управления электроприводами, отвечающих требованиям производственного процесса [2, 3, 4]. Важным фактором является возможность повышения производительности, снижение потребления ресурсов, а, также, надежность внедряемых

систем. В современных реалиях промышленного производства для обеспечения поддержания постоянства скорости при постоянно изменяющихся значениях моментов нагрузки приходится применять замкнутые системы регулирования с датчиками скорости. В большинстве случаев для получения абсолютно жестких механических характеристик применяют системы с обратными связями по току и скорости. Принципы построения систем управления двигателем переменного тока имеют некоторые особенности, в отличие от двигателей постоянного тока:

- величина момента двигателя определяется произведением векторов электромагнитных параметров цепи ротора и статора;
- ток фазы двигателя зависит не только от приложенного напряжения и характеристик машины, но и от двух других фазных токов;
- задачами системы управления является регулирование не только скорости и момента, но и основного потока двигателя для более эффективного использования машины.

Таким образом, разработка эффективных систем управления сводится к созданию многоканальных систем регулирования в основном с использованием микропроцессорных средств [3]. Большинство современных разработок ориентированы на создание систем управления асинхронным короткозамкнутым двигателем (АДКЗ), что обусловлено высокой надежностью применяемого двигателя [5]. Однако в некоторых энергосберегающих областях промышленности (металлургической, горнодобывающей) используются электроприводы, постоянно работающие в тяжелых условиях. В данных агрегатах, как правило, применяются асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР). Эти двигатели также широко применяются в электроприводах кранов, конвейеров, подъемных механизмов, намоточно-размоточных механизмов листовых прокатных и волочильных станов.

Применение системы частотно регулируемого привода с АДКЗ на таких агрегатах ограничено в первую очередь его пониженным пусковым моментом по сравнению с АДФР. Таким образом, сохраняют актуальность задачи изучения и разработки систем электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором.

Методы

Одним из известных направлений совершенствования электроприводов на базе АДФР является перевод двигателя в синхронный режим, получаемый в схеме, показанной на рисунке 1, за счет вращения поля статора и протекании постоянного тока по обмоткам ротора, втянутого в синхронизм [4, 6, 7, 8]. Питание обмоток ротора постоянным током, при условии его регулирования, дает возможность реализовать управление величиной реактивной мощности, потребляемой статором двигателя из сети, что позволяет влиять на КПД и другие показатели работы двигателя. Механические характеристики такого асинхронного синхронизированного двигателя являются «абсолютно жесткими», что характерно для синхронного двигателя [7].

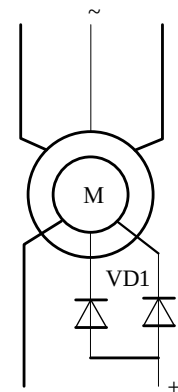


Рис. 1. Схема синхронизированного асинхронного двигателя

Fig. 1. Diagram of a synchronized asynchronous motor

Обмотку статора АДФР, работающего в синхронизированном режиме, можно питать, применяя разные схемы, например, ее можно подключить напрямую в трехфазной сети, что характерно для схем питания синхронной машины [9]. Рассмотрим векторную диаграмму синхронной неявнополюсной машины, приведенную на рисунке 2. Регулирование тока возбуждения приводит к изменению потребления реактивного тока, момент двигателя возрастает при увеличении угла нагрузки θ , область устойчивой работы ограничена значениями угла нагрузки в пределах от -90 до $+90$ градусов [10].

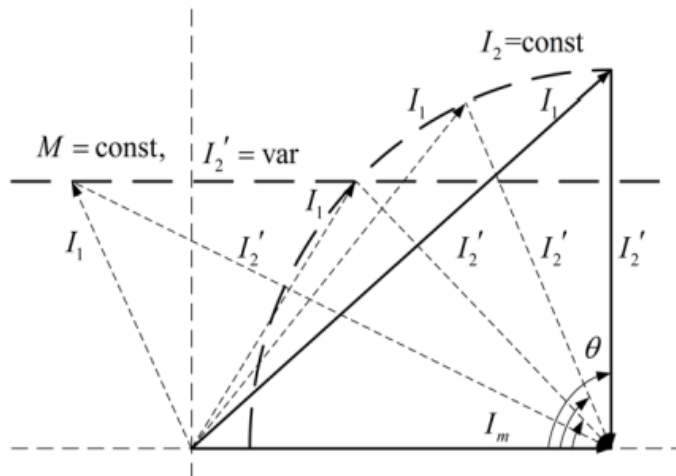


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины

Fig. 2. Vector diagram of a synchronous implicit pole machine

В системах частотного управления, построенных на основе автономного инвертора тока, следует оценивать устойчивость всей системы в целом, так как при формировании мгновенных значений фазных токов, отсутствует контроль за мгновенными значениями фазных напряжений статора, и при возникновении внезапных возмущающих воздействий, устойчивость всей системы определяется не только величиной угла θ , но и реакцией на возникающие возмущения. [11]. При построении векторной диаграммы (рисунок 3), позволяющей вести анализ поведения синхронизированного электропривода, зафиксируем положение вектора тока статора в направлении вертикальной оси [12, 13].

Для обеспечения условия поддержания потокосцепления двигателя на постоянном уровне, конец вектора намагничивающего тока должен находиться на окружности, центр которой расположен в начале вектора тока статора. В рассматриваемом наглядном случае на векторной диаграмме модули токов статора и ротора приняты равными между собой. На основании теоремы косинусов, можно выделить следующие особенности:

- площадь треугольника, две стороны которого образованы векторами токов, максимальна при угле 90 градусов между ними;
- при тупом угле между векторами в случае уменьшения этого угла площадь треугольника, образованного этими векторами, увеличивается;
- при остром угле между векторами, в случае уменьшении этого угла площадь треугольника, образованного этими векторами, уменьшается.

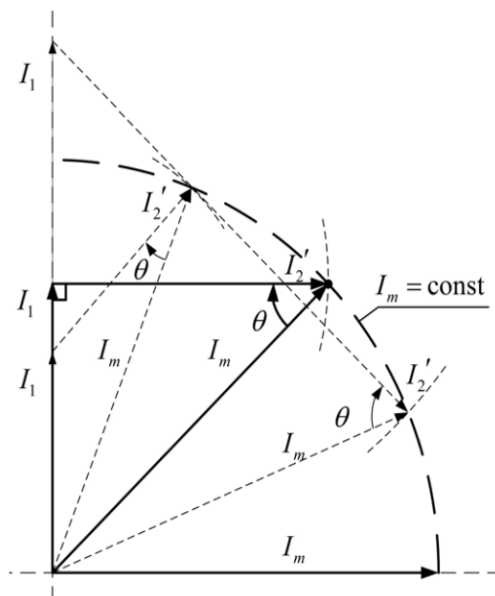


Рис. 3. Векторная диаграмма синхронизированной асинхронной машины

Fig. 3. Vector diagram of a synchronized asynchronous machine

Любое изменение - наброс или сброс нагрузки на валу двигателя приводит к

изменению угла поворота вектора тока ротора относительно неподвижного вектора тока статора. Наброс нагрузки сопровождается снижением угла между векторами токов, сброс нагрузки - ростом угла между векторами токов [14,15].

На основании анализа векторной диаграммы (рисунок 3) можно сделать следующее заключение: при постоянных по величине токах статора I_1 и ротора I_2 , синхронизированный двигатель обладает устойчивостью только в тех режимах, где угол между векторами токов статора и ротора составляет величину, большую или равную 90 градусам. Поскольку в номинальном режиме угол между векторами токов статора и ротора оказывается меньше 90 градусов, то для обеспечения устойчивости электропривода необходима коррекция системы управления с введением дополнительного контура стабилизации угла нагрузки.

На рисунке 4 приведена функциональная схема частотного синхронизированного электропривода, выполненного на базе автономного инвертора тока. Преобразователь частоты, питающий обмотку статора, построен на основе стандартной схемы с нерегулируемым выпрямителем, конденсаторным фильтром C в звене постоянного тока и автономным инвертором на IGBT-транзисторах. Его особенностью является включение в силовую часть дополнительных элементов: ключевого транзистора $VT7$, шунтирующего диода $VD1$, необходимого для обеспечения протекания тока в моменты, когда ключевой транзистор $VT7$ заперт, реактора L . Обмотки ротора через диод $VD2$ включены последовательно между выпрямителем и инвертором в звено постоянного тока преобразователя частоты. При таком изменении схемы силовой части преобразователя частоты автономный инвертор приобретает свойства инвертора тока.

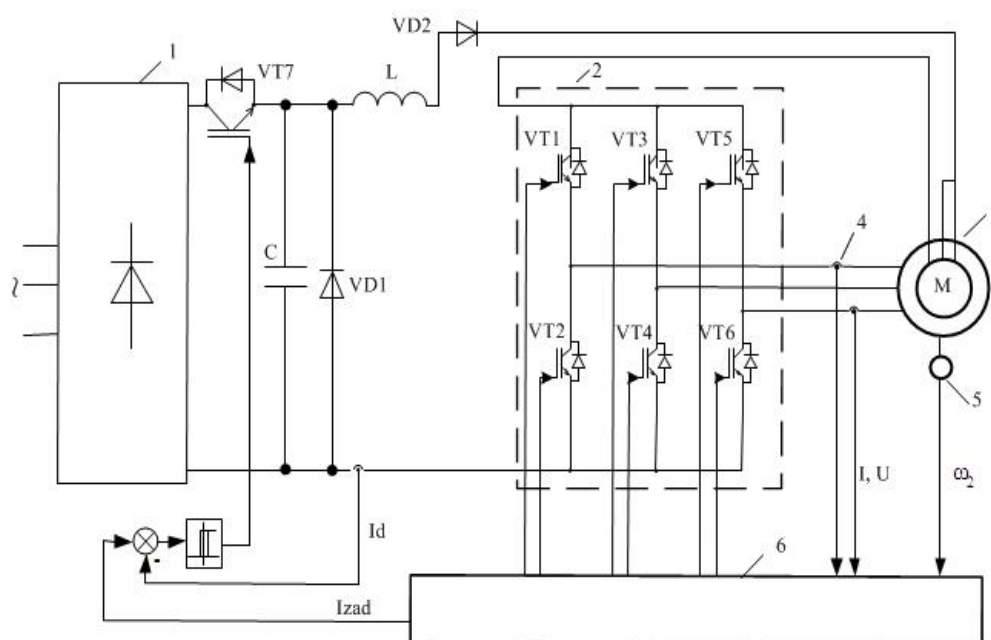


Рис. 4. Функциональная схема частотного асинхронного синхронизированного электропривода на базе АИТ с подключением ротора к звену постоянного тока

Fig. 4. Functional diagram of a frequency asynchronous synchronized electric drive based on AIT with the connection of the rotor to the DC link

Система управления 6 обрабатывает сигналы, поступающие от датчиков 4 напряжений и токов, а также датчика скорости 5, установленного на валу двигателя. Транзистор $VT7$ управляется релейным регулятором тока, работающим на основе сравнения, заданного и действительного значений тока в выпрямленной цепи. Релейный регулятор тока статора (рисунок 5) выполняет сравнение на выходах сумматоров заданных и действительных значений фазных токов [16, 17].

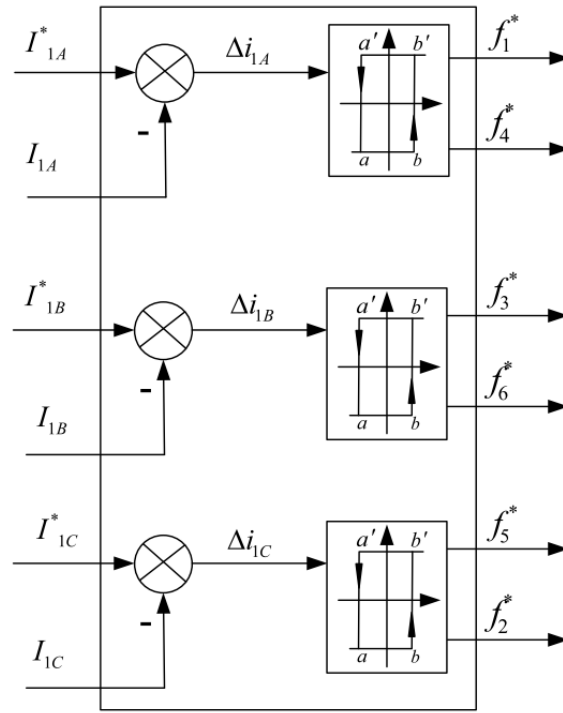


Рис. 5. Функциональная схема релейных регуляторов фазных токов обмотки статора

Fig. 5. Functional diagram of relay regulators of phase currents of the stator winding

Сигналы рассогласования определяются по формуле (1):

$$\begin{cases} \Delta i_{1A} = i_{1A}^* - i_{1A} \\ \Delta i_{1B} = i_{1B}^* - i_{1B} \\ \Delta i_{1C} = i_{1C}^* - i_{1C} \end{cases} \quad (1)$$

где i_{1A}^* , i_{1B}^* , i_{1C}^* , i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} - заданные и действующие значения токов в фазах статора.

Сигналы рассогласования сравниваются с пороговым значением τ , и на выходе регулятора тока вырабатываются сигналы (2):

$$\begin{cases} \text{если } \Delta i_1 \leq \tau / 2, \text{ то на выходе (0),} \\ \text{если } \Delta i_1 > \tau / 2, \text{ то на выходе (1);} \end{cases} \quad (2)$$

где τ - зона нечувствительности, определяющая точность и быстродействие релейного регулятора. Сигналы с выходов регуляторов поступают в схему управления силовыми транзисторами инвертора тока.

Блок-схема системы управления асинхронным синхронизированным электроприводом, собранная в пакете прикладных программ *Matlab Simulink*, приведена на рисунке 6.

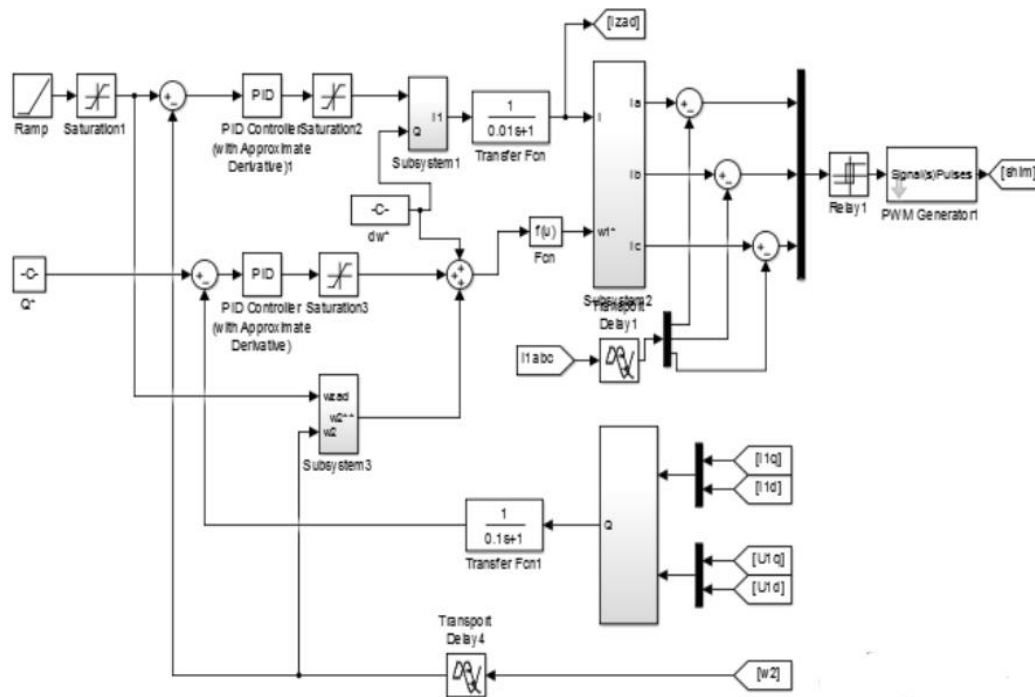


Рис. 6. Блок-схема системы управления

Fig. 6. Control system block diagram

Особенностью системы управления синхронизированным асинхронным двигателем является необходимость контроля угла нагрузки [16,17], величина которого определяется в соответствии с формулой (3):

$$\theta_{эл} = \int \omega_1 dt - \int \omega_{эл} dt \quad (3)$$

где ω_1 – частота напряжения цепи статора; $\omega_{эл} = \omega p_n$; ω – частота ротора; p_n – число пар полюсов.

Для обеспечения стабильности работы системы в процессе пуска и изменения нагрузки требуется корректировать частоту тока статора. Это обеспечивается введением в систему управления дополнительного контура контроля и регулирования в заданном диапазоне значения угла нагрузки θ . При настройке контура регулирования угла θ необходимо руководствоваться следующими принципами:

- характер колебаний угла θ определяется механическими параметрами механизма;
- на величину статического момента влияет среднее за период колебаний значение угла нагрузки; [18,19];
- для снижения амплитуды колебаний сигнал коррекции должен быть синфазен сигналу колебаний системы.

Величина коэффициента k определяется требованиями быстроты регулирования угла θ . Чем он больше, тем выше быстродействие системы, но снижается ее устойчивость. Для каждого механизма рекомендуется определять свой расчетный коэффициент. Постоянная времени T контура стабилизации угла нагрузки выбирается исходя из величины частоты колебаний системы.

Значение T должно быть больше этой частоты. Однако, слишком большое увеличение этого параметра приводит к снижению динамики переходного процесса. Сигналы задания фазных токов с учетом коррекции частоты рассчитываются по формулам (4):

$$\begin{aligned} I_a^* &= I_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ I_b^* &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_0) \\ I_c^* &= I_m \sin(\omega t + 240^\circ + \varphi_0) \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_0 – выходной сигнал контура регулирования угла θ .

При питании статора синхронизированного двигателя от преобразователя частоты с АИН, а ротора - от звена постоянного тока преобразователя частоты, в цепь звена

постоянного тока необходимо включать специальный транзисторный коммутатор.

Назначением его является преобразование постоянного напряжения с выхода неуправляемого выпрямителя в постоянное напряжение необходимой величины. Подобный коммутатор необходим для обеспечения стабильным напряжением статора и ротора синхронизированного электропривода, а также для компенсации падения напряжения, возникающего за счет подключенного в ЗПТ ротора. Схема такого стабилизатора напряжения представлена на рисунке 7.

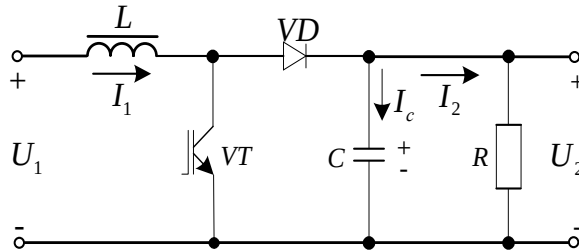


Рис. 7. Схема устройства для повышения напряжения в звене постоянного тока частотного преобразователя

Fig. 7. Diagram of the device for increasing the voltage in the DC link of the frequency converter

Управление преобразователем постоянного напряжения возможно осуществлять, также используя релейный регулятор, принцип действия которого описан выше.

Результаты и обсуждения

Описанная система управления, собранная в среде *Matlab Simulink* [20] изображена на рисунке 8. Результаты компьютерного моделирования процесса пуска электропривода приведены на рисунке 9. Полученные графики переходных процессов показывают, что в разработанной системе электропривода обеспечивается стабилизация пускового момента и поддержание постоянства ускорения, что требуется для механизмов циклического действия.

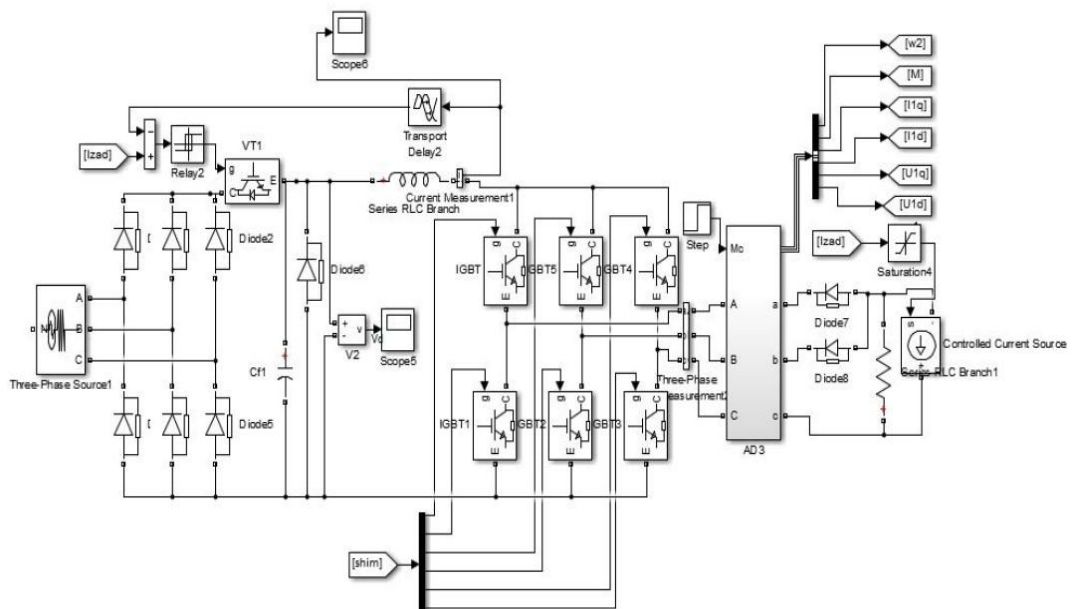


Рис. 8. Схема синхронизированного электропривода

Fig. 8. The scheme of the synchronized electric drive

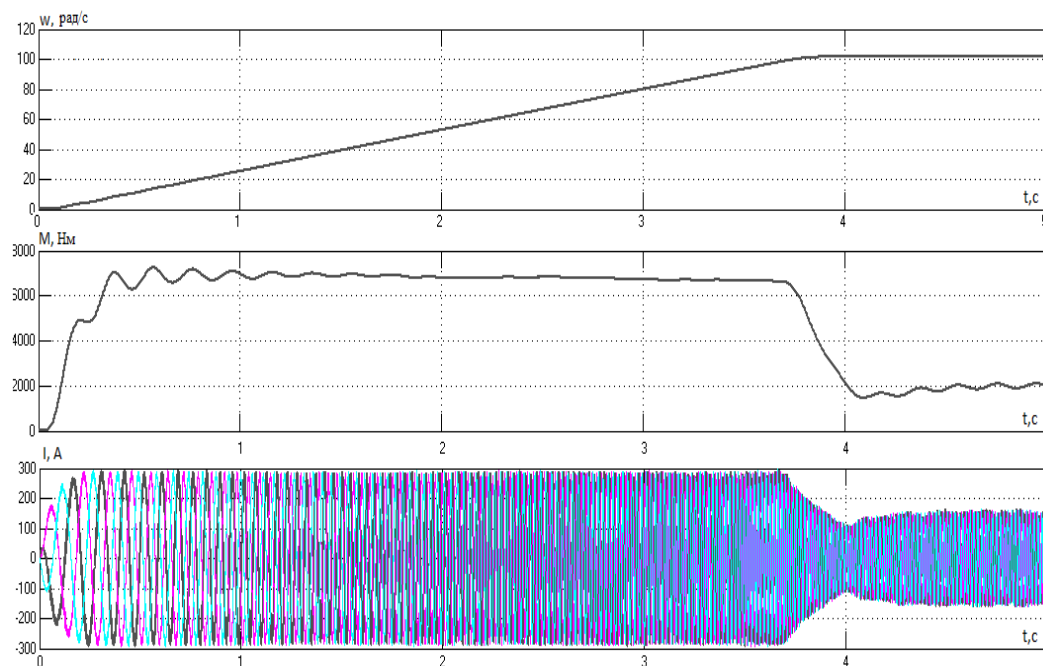


Рис. 9. Результаты моделирования разработанной системы электропривода

Fig. 9. Simulation results of the developed electric drive system

Выводы

В работе описана и смоделирована система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом. Для обеспечения устойчивости электропривода в системе управления выполняется коррекция сигнала задания частоты тока статора за счет введения дополнительного контура регулирования угла нагрузки двигателя. Подобная коррекция необходима для стабилизации момента за счет ориентации в каждый момент времени вектора тока статора относительно вектора тока ротора. Данная система управления рекомендуется к применению в электроприводах с циклическим режимом работы.

Литература

1. Мещеряков В.Н. Системы регулируемого асинхронного электропривода для подъемно-транспортных механизмов: монография. Липецк: ЛГТУ, 2005. 112 с.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22(2). С. 65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.
3. Онищенко Г.Б., Юньков В.Ю. Основные тенденции развития автоматизированного электропривода // АЭП 2016: Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. Пермь, 2016. С.81-83.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(5):87-96.
5. Мещеряков В.Н., Башлыков А.М. Синхронизированный асинхронный электропривод // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №3. Ч. 4. С. 101-104.
6. Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В и др. Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий // Электротехника. 2015. № 4. С. 34-40.
7. Omelchenko E.Y., Telezhkin O.A., Enin S.S., et al. Computer Model of a Synchronized Asynchronous Motor. Procedia Engineering, 2015. V. 129. pp. 629-634.
8. Ma S.H. Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 253.
9. Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Енин С.С. и др. Математическая и компьютерная модель синхронизированного асинхронного двигателя // Электроприводы переменного

тока: Труды международной 15 научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2015. С.137-140.

10. Tlali P.M, Wang R and Gerber S. Comparison of PM Vernier and Conventional Synchronous 15 kW Wind Generators. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018.

11. Meshcheryakov V, Sibirtsev D, Mikhailova E. Mathematical Simulation of the Synchronized Asynchronous Electric Drive // E3S Web of Conferences V. 178 (2020), High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020).

12. Якимов С.Б. Проблема больших токов. Поиск оптимальных путей решения. / Инженерная практика. Производственно-технический нефтегазовый журнал // 2016. №3. С. 14- 19.

13. Rodriguez J., Kennel R.M., Espinoza J.R., et al. High performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment. IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, 59, pp 812–82

14. Голубев А.Н., Белоногов В.Г. Разработка многоканальной системы управления многофазным синхронным электроприводом с улучшенными виброшумовыми характеристиками // Вестник ИГЭУ. 2020. № 3. С. 43–50.

15. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2006. 333 p.

16. Вдовин В.В., Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования [Текст]: диссертация. ... Вдовин В.В. Новосибирск, 2014. 244 с.

17. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors (Control systems and information technologies, 2017. № 2 (68). P. 48-57.

18. Yang Yu., Mi Z., Guo X., et al. Low speed control and implementation of permanent magnet synchronous motor for mechanical elastic energy storage device with simultaneous variations of inertia and torque // IET Electr. Power Appl. 2016. № 10. pp. 172–180.

19. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors (Control systems and information technologies, 2017. №2 (68). P. 48-57.)

20. Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V., Shakurova Z.M., et al. Energy saving system of cascade variable frequency induction electric drive (SES 2019. Kazan, E3S Web of Conferences. 2019. C. 01037.

Авторы публикации

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Сибирцев Дмитрий Сергеевич – инженер, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Валтчев Станимир – профессор, Новый Лиссабонский университет; ТУ София и БФУ Болгария.

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

References

1. Meshcheryakov VN. *The systems of the adjustable asynchronous electric drive for hoisting-and-transport mechanisms*. Lipetsk: LGTU Publ., 2005. 112 pp.

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

3. Onishchenko GB, Yun'kov VYu. *Osnovnye tendentsii razvitiya avtomatizirovannogo elektroprivoda*. AEP 2016; Trudy 9 Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu. Perm', 2016. pp.81-83.

4. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial

networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):87-96. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>.

5. Meshcheryakov VN, Bashlykov AM. Sinkhronizirovannyi asinkhronnyi elektroprivod. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010;3(4):101-104.

6. Bepalov VYa, Kobelev S, Kruglikov OV, et al. Razrabotka i osvoenie proizvodstva energoeffektivnykh asinkhronnykh dvigatelei massovykh serii. *Elektrotehnika*. 2015;4:34-40.

7. Omelchenko EY, Telezhkin OA, Enin SS, et al. *Computer Model of a Synchronized Asynchronous Motor. Procedia Engineering*. 2015;129:629-634.

8. Ma SH. *Study on the application of permanent magnet synchronous motors in underground belt conveyors*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017;253. doi: 10.1088/1757-899X/283/1/012006.

9. Omelchenko EYa, Telezhkin OA, Enin SS. *Matematicheskaya i komp'yuternaya model' sinkhronizirovannogo asinkhronnogo dvigatelya*. Elektroprivody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoi 15 nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Ekaterinburg. 2015. C.137-140.

10. Tlali PM, Wang R and Gerber S. *Comparison of PM Vernier and Conventional Synchronous 15 kW Wind Generators*. 2018. 13 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018.

11. Meshcheryakov V, Sibirtsev D, Mikhailova E. *Mathematical Simulation of the Synchronized Asynchronous Electric Drive*. E3S Web of Conferences V. 178 (2020), High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020).

12. Yakimov SB. Problema bol'shikh tokov. Poisk optimal'nykh putei reshe-niya. *Inzhenernaya praktika. Proizvodstvenno-tehnicheskii neftegazovyi zhurnal*. 2016;3:14-19.

13. Rodriguez J, Kennel RM, Espinoza JR, et al. *High performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment*. (IEEE Trans. Ind. Electron, 2012, 59, pp 812–82

14. Golubev AN, Belonogov VG. Razrabotka mnogokanal'noi sistemy upravleniya mnogofaznym sinkhronnym elektroprivodom s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami. *Vestnik IGEU*. 2020;3:43-50.

15. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*. 2006. 333 p.

16. Vdovin VV. *Adaptivnye algoritmy otsenivaniya koordinat bezdatchiko-vykh elektroprivodov peremennogo toka s rasshirennym diapazonom regulirova-niya*: dissertatsiya. Novosibirsk. 2014. 244 p.

17. Meshcheryakov VN, Sibirtsev DS. *Frequency asynchronous electric drive with correction of phase shift between moment-forming vectors*. Control systems and information technologies. 2017, 2 (68):48-57.

18. Yang Yu, Mi Z, Guo X, et al. *Low speed control and implementation of permanent magnet synchronous motor for mechanical elastic energy storage device with simultaneous variations of inertia and torque*. IET Electr. Power Appl. 2016;10:172-180.

19. Meshcheryakov VN, Lastochkin DV, Shakurova ZM, et al. *Energy saving system of cascade variable frequency induction electric drive*. SES 2019. Kazan, E3S Web of Conferences. 2019. C. 01037.

Authors of the publication

Viktor N. Meshcheryakov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. Email: mesherek@stu.lipetsk.ru

Dmitry S. Sibirtsev – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon; TU Sofia and BFU Bulgaria.

Elena I. Gracheva – Kazan State Energy University, Kazan, Russia.

Получено

06.04.2021 г.

Отредактировано

13 04 2021 г.

Принято

26 04.2021 г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ВАТТМЕТРОГРАММЫ

В.А. Манахов, А.Н. Цветков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является разработка метода диагностики оборудования штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) в процессе эксплуатации по параметрам ваттметрограммы. В качестве измерительного элемента применяется модуль ваттметрирования, инструментом для обработки вибрационных сигналов служит разработанное программное обеспечение в программном комплексе MatLab. Техническое состояние ШСНУ анализируется по параметрам ваттметрограммы и амплитудным спектрам исследуемого объекта, сформированным с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье в программной среде MatLab.

МЕТОДЫ. Метод ваттметрирования позволяет осуществлять контроль ШСНУ во время его работы под напряжением. Данный метод контроля является высокоточным, чувствительным к развивающимся дефектам, позволяет применять компьютерные технологии для обработки и анализа сигналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Метод ваттметрирования раскрыт в полном объеме. Рассмотрено построение спектра. Установлена взаимосвязь ваттметрограммы с динамограммы. Произведено снятие и оценка экспериментальных данных с действующей ШСНУ во время ее работы. Построена ваттметрограмма и динамограмма, так же построен спектр, который показал наличие дефектов на данной установке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данный метод ваттметрирования с программным обеспечением MatLab позволяет контролировать техническое состояние ШСНУ по амплитудно-частотным характеристикам параметров ваттметрограммы.

Ключевые слова: ваттметрограмма, штанговая скважинная насосная установка, нефтяное оборудование, диагностика, анализ, спектр, динамограмма, станок-качалка, MatLab.

Для цитирования: Манахов В.А., Цветков А.Н. Определение состояния и функционирования оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации по параметрам ваттметрограммы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 127-139. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139.

DETERMINATION OF THE STATE AND FUNCTIONING OF THE EQUIPMENT OF ROD WELL PUMPING UNITS IN THE OPERATION PROCESS BY THE PARAMETERS OF THE WATTMETROGRAM

VA. Manakhov AN. Tsvetkov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Abstract: TARGET. The purpose of this work is to develop a method for diagnostics of equipment of sucker rod pumping units (SRPU) during operation according to the parameters of the wattmetrogram. A wattmetering module is used as a measuring element, the developed software in the MatLab software package serves as a tool for processing vibration signals. The technical condition of the sucker rod pumping unit is analyzed by the parameters of the wattmetrogram and the amplitude spectra of the object under study, formed using the fast Fourier transform procedure in the MatLab software environment.

METHODS. The wattmetering method allows you to control the sucker rod-pumping unit during its operation under voltage. This control method is highly accurate, sensitive to developing defects, and allows the use of computer technologies for signal processing and analysis.

RESULTS. The wattmetering method is fully disclosed. The construction of the spectrum is considered. The relationship between the wattmetrogram and the dynamogram has been established. The removal and evaluation of experimental data from the operating sucker-rod pumping unit during its operation was carried out. A wattmetrogram and a dynamogram were built, a spectrum was also built, which showed the presence of defects in this installation.

CONCLUSION. This method of wattmetering with the MatLab software allows you to monitor the technical condition of the sucker rod pumping unit according to the amplitude-frequency characteristics of the wattmetrogram parameters.

Keywords: wattmetrogram, sucker rod pumping unit, oil equipment, diagnostics, analysis, spectrum, dynamogram, rocking machine, MatLab.

For citation: Manakhov VA, Tsvetkov AN. Determination of the state and functioning of the equipment of rod well pumping units in the operation process by the parameters of the wattmetrogram. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):127-139. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139.

Введение

Нефтяная индустрия Российской Федерации в последние годы испытывает сильный упадок в связи с возникающими кризисами из-за пандемии коронавируса COVID-19, вследствие чего стоимость нефти марки Brent упала по состоянию на 26 декабря 2019 с 67,88 до 21,83 американских долларов за баррель по состоянию на 23 апреля 2020 года. В настоящее же время цена выравнивается из-за постоянно растущего спроса на нефтепродукты (Рис 1).

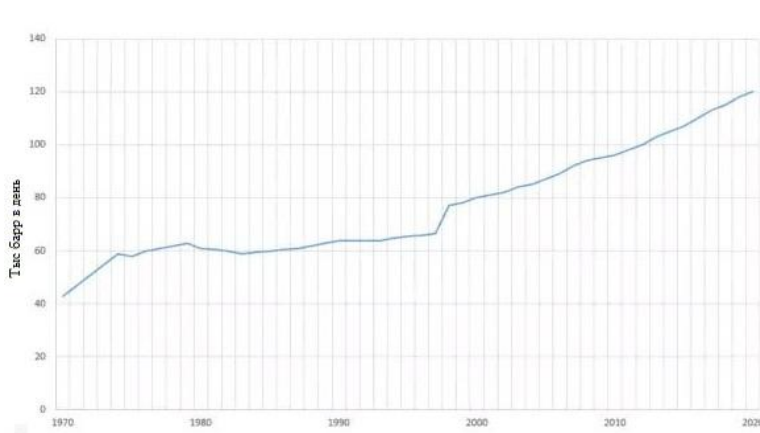


Рис. 1. Мировой спрос на нефть за 50 лет

Fig. 1. World oil demand over 50 years

Несмотря на нестабильное состояние нефти на мировом рынке, отрасль не прекращает обеспечивать как внутренние потребности государства, так и экспорт. Несмотря на сегодняшнее кризисное положение нефтяной промышленности, Российская

Федерация остается одним из крупнейших в мире производителей, потребителей и экспортеров нефти и продолжает удерживать основные позиции на мировом рынке, занимая третье место в мире по добыче нефти.

Для нефтяных компаний, осуществляющих добычу нефти с помощью штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ), актуальными задачами остаются повышение энергоэффективности и оптимизации режимов работы данной установки, вследствие чего снизятся материальные затраты на поддержание работоспособности, перехода от планово-предупредительного ремонта ШСНУ к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

Решение данных задач возможно посредством методов и средств приборного контроля, осуществляющих регистрацию и параметров работы установок.

Литературный обзор

Предположение о возможности применения ваттметрограмм для контроля за работой ШСНУ были впервые высказаны профессором Куликовским Лонгином Францевичем еще в 1948 г., но не были разработаны методики расшифровки ваттметрограмм. С помощью этого метода можно определить:- состояние работы насоса;

- степень неуравновешенности станка-качалки;
- наличие отрицательных усилий, ведущих к преждевременному выходу из строя редуктора;
- степень износа и состояние отдельных узлов станка-качалки;
- состояние ремней передачи;
- степень загрузки электродвигателя. [1].

Как средство диагностики ваттметрирование стало применяться раньше, чем динамометрирование. В СССР для обработки ваттметрограмм в 1975 году ученым, доктором технических наук Кричке Владимиром Оскаровичем были разработаны электронные аналоговые приборы. Однако широкому распространению этого метода диагностики помешала невысокая вычисляемая мощность контроллеров. Ваттметрирование является одним из лидеров по информативности методом контроля и диагностики оборудования ШСНУ.

В настоящее время данным вопросом активно занимается доктор технических наук Хакимьянов Марат Ильгизович из Уфимского государственного нефтяного технического университета, им написано более 30 работ по данной тематике.

Так же созданием и эксплуатацией контроллеров и станций управлений, которые включают в себя снятие и обработку ваттметрограмм занимаются как отечественные, так и иностранные компании в основном производства США. «ABB» (США), «Lufkin Automation» (США), «eProduction Solutions» (США), «Automation Electronics» (США), «DrSCADA Automation» (США), «International», ЗАО Линт (Россия, г.Казань), ГУПНН «Авитрон-Ойл» (Россия, г.Уфа), НПФ «Интек» (Россия, г.Уфа), «Шатл» (Россия, г.Казань), ООО «Аякс» (Россия, г.Ульяновск), «НПО «Интротест» (Россия, г.Екатеринбург), ННП «Рос» (Россия, г.Пермь), ООО "НГП ИНФОРМ (Россия, г.Уфа). [2]

Выполняемые функции касаются анализа ваттметрограмм иностранных и отечественных систем аналогичны, отличаются лишь алгоритмы их реализации. В зарубежных контроллерах в большинстве случаев есть средства ввода и отображения информации непосредственно на объекте – графические дисплеи с клавиатурой. В отечественных разработках для настройки предусматривается подключение ноутбука, в некоторых в самой станции управления возможна установка специальной панели отображения информации. Стоимость импортных систем существенно выше, чем стоимость отечественных разработок. Кроме того, при использовании отечественных станций управления все проблемы с ремонтом и модернизацией оборудования будут решаться значительно быстрее. [2]

В настоящее время, в связи с повышенными требованиями к качеству и надежности контроля за работой станков-качалок при минимальных затратах по обслуживанию, ваттметрографический метод заслуживает внимание и дальнейшего развития.

Материалы и методы (Materials and methods)

Конструкция ШСНУ очень проста и состоит из двух основных частей непосредственно самого станка-качалки то есть привода насоса, собственно которое мы и видим на поверхности земли и подземные его части находящийся в самой скважине то, что скрыто от наших глаз глубоко под землей и это, как правило, штанги насосно-компрессорные трубы (НКТ) и скважинный погружной насос.

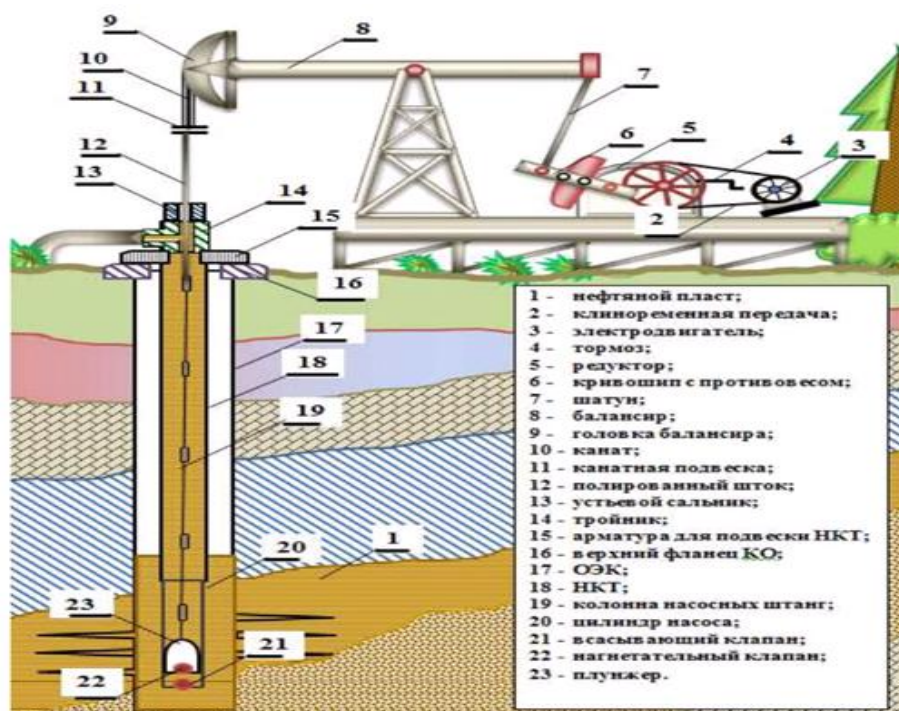


Рис. 2. Конструкция ШСНУ

Fig. 2. Design of sucker rod pumping unit

Надземная часть состоит из электродвигателя привода насоса, который качает нефть, он стоит на земле, на бетонной плите и постоянно работает, качаясь сверху вниз туда и обратно по принципу кривошипно-шатунного механизма. Электродвигатель качалки передает вращательное движение через редуктор и ременную передачу на кривошип, который преобразует эту энергию из вращательного в возвратно-поступательное движение шатунов и траверсы. В итоге мы получаем попеременное качания балансира, вверх и вниз тем самым обеспечивая поднятие и опускание подземных элементов насоса.

Подземная часть - это единая сборная конструкция, которая подвешивается путем скрепления многочисленных насосно-компрессорных труб насосных штанг и штангового насоса, находится глубоко под землей на расстоянии от 500 метров до нескольких километров от поверхности земли.

Штанговый скважинный насос включает в себя такие основные элементы как: корпус в виде цилиндра, внутри установлен поршень или плунжер, который является вытеснителем. За счет энергии подаваемой приводом посредством штанги, вытеснитель может линейно перемещаться внутри корпуса. Всасывающий обратный клапан, установлен в нижней части насоса, нагнетательный (напорный) обратный клапан, установлен в верхней части насоса.

Обратные клапаны позволяют жидкости протекать только в одном направлении. При движении поршня вверх и за счет увеличения объема в камере создается разрежение, в

результате чего жидкость через всасывающий клапан попадает в полость насоса. (Рис.3 б) Запорный элемент нагнетательного клапана в этот момент прижат к седлу, следовательно, этот клапан закрыт. Во время движения плунжера вниз объем рабочей камеры уменьшается, давление в ней возрастает, под действием этого давления всасывающий клапан закрывается, а нагнетательный отрывается. (Рис.3 в). Жидкость через нагнетательный клапан начинает поступать в полость над плунжером. При каждом цикле в скважину будет поступать новая порция нефти, которая постепенно будет подниматься вверх (Рис. 3 г).

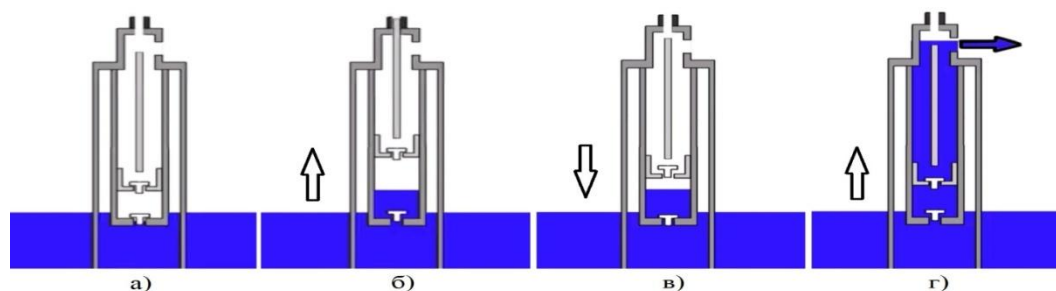


Рис. 3. Принцип действия штангового насоса

Fig. 3. Principle of operation of a sucker rod pump

Главной задачей любой диагностики, как и диагностики по параметрам ваттметрограммы, является установление технического состояния оборудования и его элементов, а также выявление неисправностей с целью рационального планирования технического обслуживания, эксплуатации и ремонта для обеспечения требуемой надежности. Ваттметрирование позволяет диагностировать работу ШСНУ. Ваттметрограмма это есть - зависимость мгновенных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем ШСНУ, от времени в зависимости от угла поворота кривошипа: $P(t)$, $P(\phi)$, где t - время в течении одного периода T качания балансира СК, ϕ - угол поворота кривошипа.

Ваттметрирование является одним из лидеров по информативности методом контроля и диагностики оборудования ШСНУ. Простота измерения количества потребляемой мощности электродвигателем является достоинством ваттметрирования для этого необходимо установка только измерительных трансформаторов напряжения и тока на трех фазах электродвигателя, также есть возможность ведения учета электроэнергии потребляемой ШСНУ [3].

Для анализа ваттметрограмм понадобится массив данных состоящих мгновенных значений силы тока и напряжения с последующим их перемножением за один период качания. Также из этих массивов могут быть получены активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, действующая значения токов и напряжения. [4]

Ваттметрирование дает возможность обнаруживать следующие неисправности электродвигателя: перегрузку по току, перекос фаз, отклонение частоты питающего напряжения и др. Ваттметрограмма позволяет в реальном времени осуществлять контроль неисправностей таких как: обрыв штанг, дефект в механическом приводе, а именно биений в редукторе, разбалансировки противовесов, дефект как нагнетательного, так и всасывающего клапанов, фонтанные проявления в скважинах, обрыв и проскальзывания ремней, неисправности полированного штока и плунжера [4].

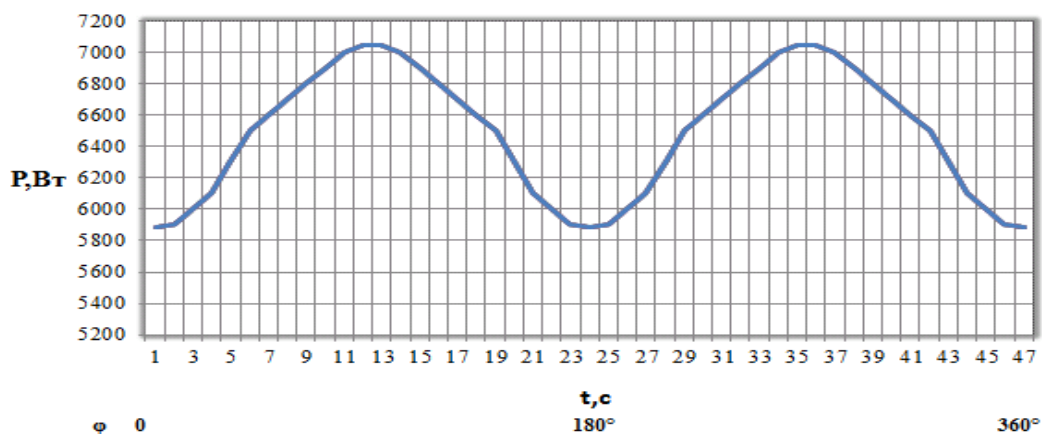


Рис. 4. Ваттметрограмма при нормальной работе установки

Fig. 4. Watt-metrogram during normal operation of the unit

Модуль ваттметрирования предназначен контроля и диагностики нефтяной скважины, оснащенной штанговым скважинным насосом в составе аппаратно-программного комплекса.

При работе в составе этого комплекса обеспечивает решение следующих задач: оперативное выявление аварийных ситуаций и несоответствия режимов эксплуатации оборудования автоматизация работы станка-качалки, оптимизация режимов работы оборудования, получение оперативной информации о состоянии объекта на пульт оператора или по сети телемеханики.

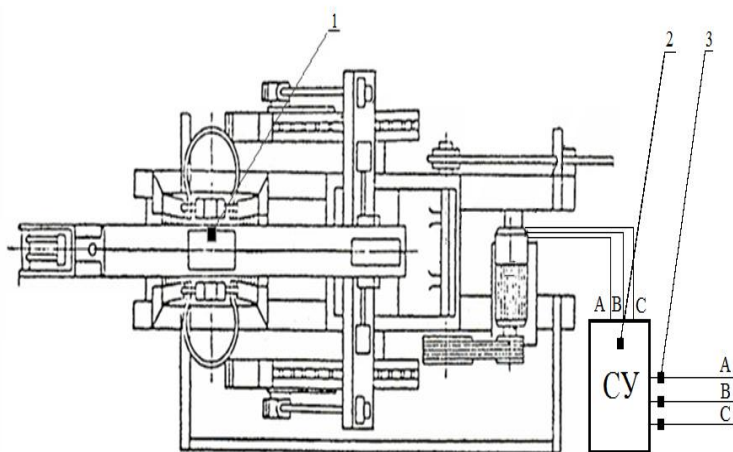


Рис. 5. Места установки датчиков на станок-качалку (вид сверху)

Fig. 5. Places of installation of sensors on the pumping unit (top view)

На рисунке 5 показано места установки датчиков, где 1 - акселерометр для определения периода работы СК, 2 - модуль ваттметрирования «CILK-UI», 3 – датчики тока и напряжения.

В данном методе для измерения переменного тока и напряжения применяются датчики на эффекте Холла. Основной частью для данных датчиков является тонкая, полупроводниковая, прямоугольная пластина с 4-мя электродами, из которых одна пара – токовые электроды предназначена для подведения тока управления подключена к коротким сторонам пластины. Вторая пара контактов, которые называются выходные контакты или холловские, предназначены для съема напряжения и располагается посередине длинных сторон. Напряжение Холла на выходных электродах возникает, если пластинку пронизывает магнитный поток, то подвижные носители зарядов образуют ток управления под действием силы Лоренца, что приводит к изменению числа носителей зарядов на концах пластинки.

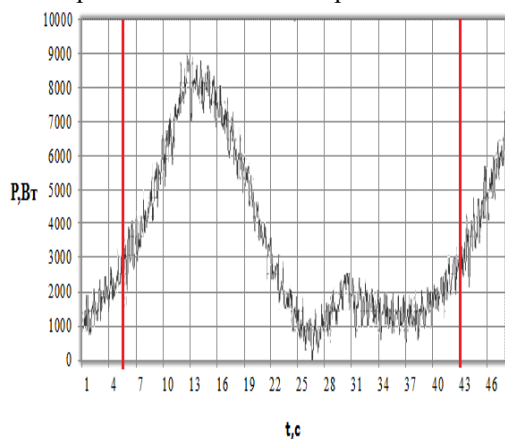
Модуль ваттметрирования предназначен непосредственно для построения ваттметрограмм с помощью измерения по трем фазам электродвигателей ШСНУ - токов, напряжений, потребляемой мощности и электроэнергии. Он устанавливается в шкаф управления скважиной или иной шкаф в соответствии с конструкторской документацией.

Модуль в процессе работы циклически измеряет значения поступающих на входные клеммы разъема Х1 тока и напряжения. По измеренным мгновенным значениям токов и напряжений трех фаз микроконтроллером модуля проводится вычисление заявленных параметров потребляемой оборудованием электроэнергии.

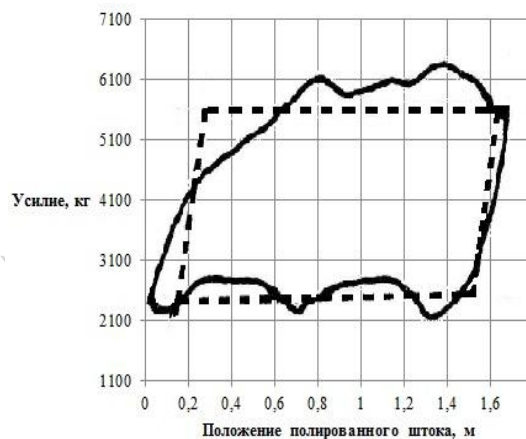
Для работы модуля необходимо, чтобы амплитуда входного напряжения фазы А превышала значение 20 Вольт переменного тока. В противном случае вычисления микроконтроллером не могут проводиться, и все результаты будут отсутствовать или могут быть неверными.

Вычисление заявленных параметров по каждой фазе ведется независимо (кроме сдвигов фаз напряжения между фазами А и В, А и С).

Далее рассмотрим неисправности ШСНУ на ваттметрограмме. Красными вертикальными отметками показан так называемый период качения станка-качалки нефти или верхнее положение полированного штока.



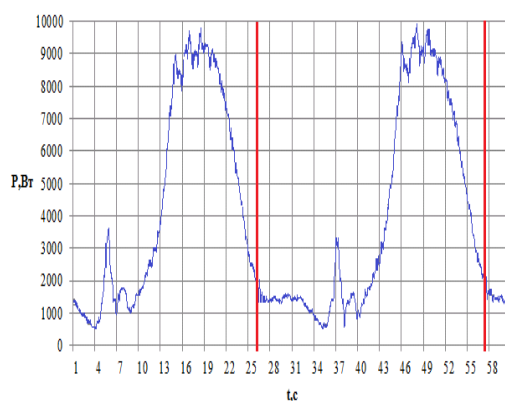
а)



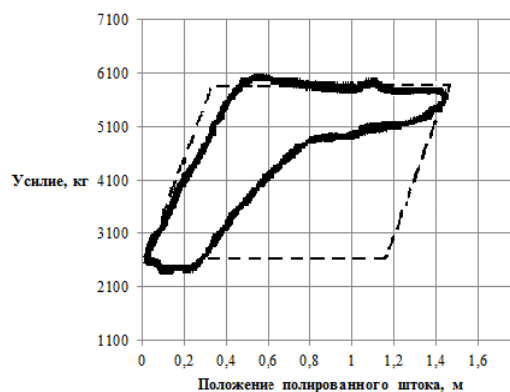
б)

Рис. 6. Дефект нагнетательного клапана а) ваттметрограмма б) динамограмма

Fig. 6. Defect of the discharge valve a) wattmetrogram b) dynamogram



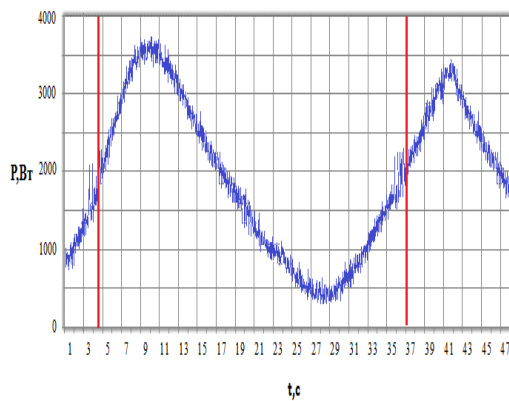
а)



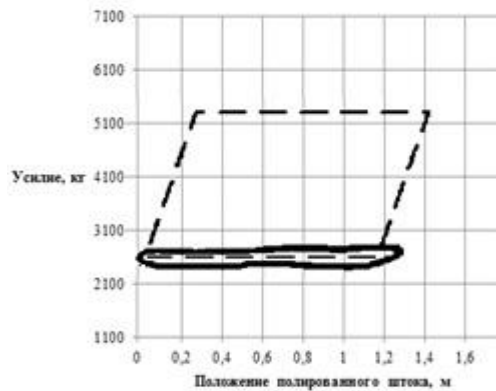
б)

Рис. 7. Наличие газа в скважине а) ваттметрограмма б) динамограмма

Fig. 7. Presence of gas in the well a) wattmetrogram b) dynamogram



а)



б)

Рис. 8. Обрыв штанг а) ваттметрограмма б) динамограмма

Fig. 8. Broken rods a) wattmetrogram b) dynamogram

Результаты (Results)

Было произведено снятие показаний в Республике Татарстан с действующей ШСНУ для анализа технического состояния нефтяного оборудования методом ваттметрирования и динамометрирования. По полученным данным построим ваттметрограмму в программном комплексе для решения задач технических вычислений «MATLAB».



Рис. 9. Ваттметрограмма с действующей ШСНУ

Fig. 9. Wattmetrogram with the current sucker rod pumping unit

И далее построим соответствующей данной ваттметрограмме динамограмму.

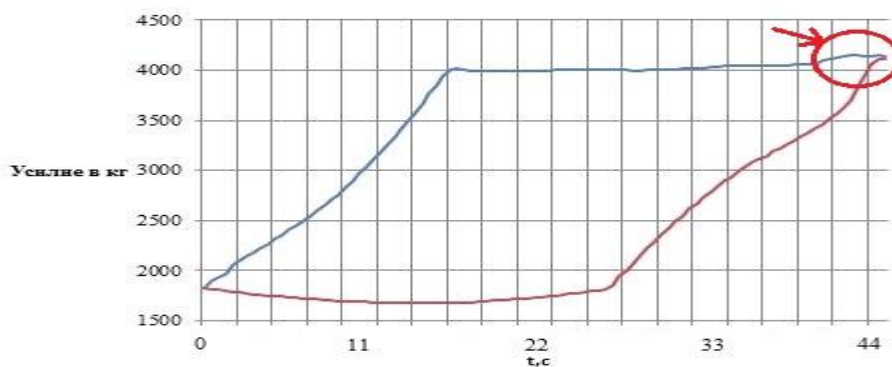


Рис. 10. Динамограмма с действующей ШСНУ

Fig. 10. Dynamogram with the current sucker rod pumping unit

На построенной ваттметрограмме мы видим неявный дефект небольших ударов плунжера о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса.

Именно с построения сглаженного графика начинается обработка ваттметрограммы. Для его построения воспользуемся в программном комплексе

«MATLAB» фильтром низких частот Чебышева (фильтр скользящего среднего) и построим сглаженную ваттметрограмму.

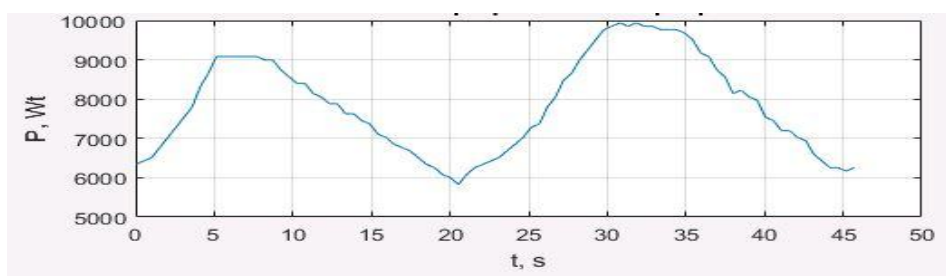


Рис. 11. Сглаженный график ваттметрограммы

Fig. 11. Smoothed wattmetrogram graph

Далее массив ваттметрограммы прогоняют через фильтр, отсекая постоянную (низкочастотную) составляющую, чтобы посмотреть вибрации, удары, шумы. Высокочастотная составляющая при этом располагается относительно нулевой оси, поэтому имеет отрицательные значения. Это позволяет увидеть наличие ударов, заеданий в определенные моменты времени, обнаружить дефекты станка-качалки и редуктора (в зубчатых передачах).

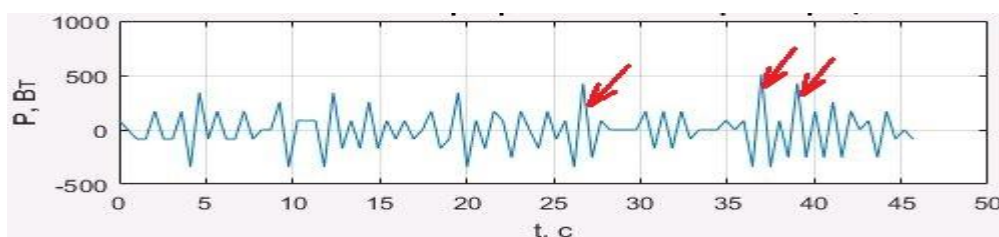
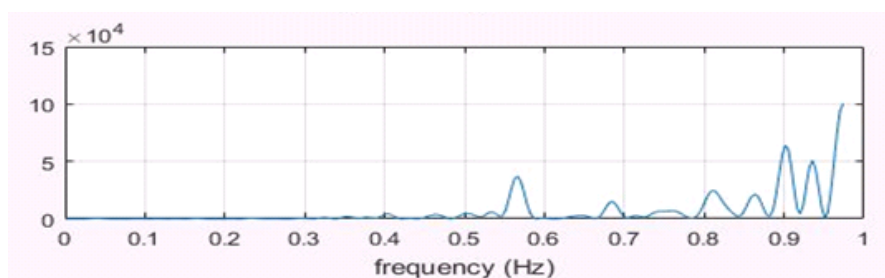


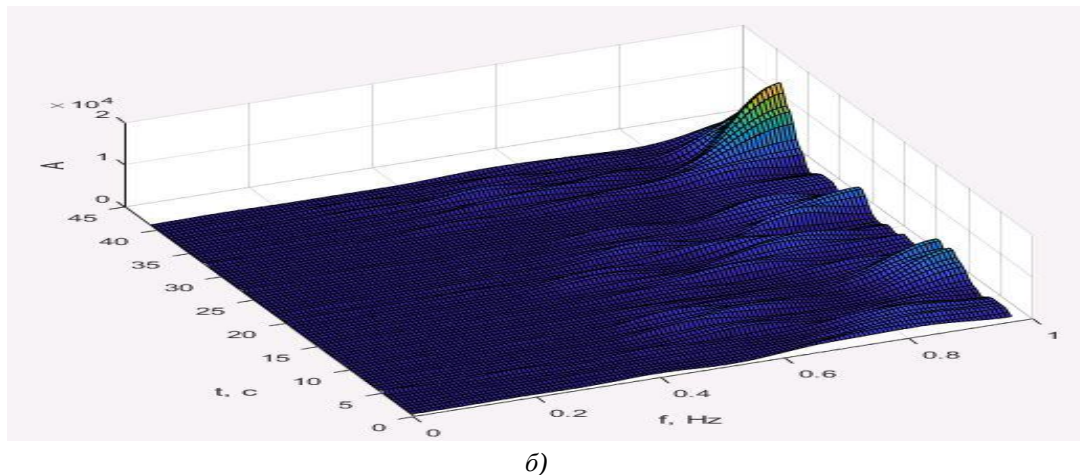
Рис. 12. Массив ваттметрограммы после фильтрации

Fig. 12. Array of wattmetrogram after filtration

После чего строим спектр данной ваттметрограммы, пропуская его через фильтр высоких частот, тем самым убирая из получившегося спектра значения с высокой частотой.



a)



б)

Рис.13.Частотный спектр сигнала в двухмерном и трехмерном виде

Fig. 13. Signal frequency spectrum in 2D and 3D view

Анализируя массив ваттметрограмм и его спектр (Рис. 12 и рис. 13) можно утверждать, что на 26,37 и 39 секунде имеется превышение среднего значения энергии шума в 2,5 раза и больше, что соответствует ударам с частотой 0,8...1Гц. Как мы можем заметить, что на 37 секунде присутствует наибольший удар, который диагностируется и с помощью построенной динамограммы (Рис. 10).

Заключение (Conclusions)

В полном объеме рассмотрено ваттметрирование ШСНУ, построение ваттметрограммы и способ ее сглаживания, построение спектра. Диагностирование с помощью этих параметров. Анализ ваттметрограмм дает возможность осуществлять контроль состояния штанговых скважинных насосных установок. С помощью ваттметрограмм могут быть рассчитаны коэффициент полезного действия станка-качалки, а также его сбалансированность. Для определения вибрационных и ударных нагрузок нам поможет анализ спектра ваттметрограмм, что дает возможность диагностировать дефекты подшипников и редуктора.

Основными преимуществами ваттметрирования перед конкурирующим методом диагностики, а именно перед методом динамометрирования является:

- относительно малое количество датчиков (трансформаторы тока и напряжения);
- возможность измерения потребляемой приводом электроэнергии;
- возможность интеграции с автоматизированными системами технического и коммерческого учёта электроэнергии.

Как уже упоминалось выше, метод ваттметрирования является достоверным и надежным методом диагностики ШСНУ, который позволяет не только ее подземной части насосной установки, но и наземной части, как например динамограмма.

Метод ваттметрирования исторически появился раньше метода динамометрирования, но не получил столь большого развития из-за отсутствия быстрого компьютерного расчета, в отличие от динамометрирования, по которому было написано множество научных работ.

Постройка динамограммы с помощью ваттметрирования и современного компьютерного оборудования поможет увеличить эффективность обоих методов, со стороны ваттметрирования – это легкость установки, минимальное количество датчиков и более глубокий анализ неисправностей с помощью спектра ваттметрограмм, а со стороны динамометрирования – это разработанность данной темы. В совокупности получившийся метод диагностики оборудования обладает преимуществами перед другими неразрушаемыми методами диагностики.

Литература

1. Исмагилов С.Ф., Гизатуллин А.Р., Салахова Г.Р. Анализ методов диагностирования технического состояния скважинных штанговых установок // Информационные технологии. проблемы и решения: материалы международной научно-практической конференции. -2016.- № 1(3).- С.35-38.
2. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Чикишев А.М., и др. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 1. С.44.
3. Хакимьянов М. И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: дис. ... док. техн. наук: 05.09.03: защищена 01.03.19: М., 2018. 355 с.
4. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. №5. С. 26-36. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_7.pdf
5. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., и др. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20(7-8):107-116.
6. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., и др. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(4):88-98.
7. Ryssel U, Ploennigs J., Kabitzsch K., et al. Generative Design of Hardware-in-the-Loop Models // APGES'07. Salzburg, Austria, 2007. P. 4–11.
8. Цветков А.Н., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., Ившин И.В. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно- поступательного действия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №3-4. С.105-111.
9. Ившин И.В., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., и др. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(5):3-13.
10. Хакимьянов М.И. Обработка ваттметрограмм штанговых глубиннонасосных установок // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Рег.№ 2012616130 от 04.07.2012.
11. Kadasheva U.M. Improvement of algorithm for converting the watmetrograms into dynamograms considering the mass of horsehead // Azerbaijan Oil Industry journal. Baku .- 2020. №2pp. 87-89.
12. Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Shinyakov Y.A. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. October. V. 9, Issue 1. P. 4403–4409
13. Frendo E., Bonamy D. English for the Oil Industry 1 Course Book. Pearson Education ESL 2017- P 80.
14. Roberto L. Soza. Review of Downhole Dynamometer Testing [электронный ресурс]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (дата обращения 01.03.2021)
15. J.F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis [электронный ресурс]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (дата обращения 17.03.2021).

Авторы публикации

Манахов Валерий Александрович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Ismagilov SF, Gizatullin AR, Salakhova GR. *Analysis of methods for diagnosing the technical condition of downhole rod rigs. Information technologies. Problems and solutions: materials of the international scientific and practical conference.* 2016;1(3):35-38.
2. Khakimyanov MI, Kovshov VD, Chikishev AM., et al. Controllers for automation of sucker rod pump installations. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business».* 2007. № 1. p.44.
3. Khakim'yanov M.I. *Increase of energy efficiency and optimization of operating modes of electric drives in the oil-producing industry: dis. ... doc. tech. Sciences: 05.09.03: protected 01.03.19: / Khakim'yanov Marat Il'gizovich. M., 2018 . 355 p.*
4. Khakim'yanov MI., Pachin MG. Monitoring of the state of sucker rod pumping units based on the results of the analysis of wattmetrograms. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»* 2011;5:26-36. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_7.pdf
5. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV, et al. Model of the control system rocking machines of oil the basic of a synchronous engines with the sensorless method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2018;20(7-8):107-116.
6. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., et al. Control measuring and information system of the experimental stand. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):88-98.
7. Ryssel U, Ploennigs J, Kabitzsch K, et al. *Generative Design of Hardware-in-the-Loop Models.* APGES'07. Salzburg, Austria, 2007. P. 4-11..
8. Tsvetkov AN, Safin AR, Gibadullin RR, et al. Hardware-software system test bench for studies of a reciprocating electrical machine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2016 №3-4 pp.105-111.
9. Ivshin IV, Safin AR, Gibadullin RR, et al. Analysis of the development of electric drives for oil rocking machines by the results of patent search. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(5):3-13.
10. Khakim'yanov MI. Processing of wattmetrograms of sucker rod pumping units. *Certificate of state registration of a computer program.* Registration No. 2012616130 dated 04.07.2012.
11. Kadasheva UM. Improvement of algorithm for converting the watmetrograms into dynamograms considering the mass of horsehead. *Azerbaijan Oil Industry journal.* Baku. 2020;2:87-89.
12. Torgaeva DS, Sukhorukov MP, Shinyakov YA, et al. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).* 2019. October. V. 9, Issue 1. pp. 4403–4409.
13. Frendo E, Bonamy D. *English for the Oil Industry.* Pearson Education ESL 2017. P 80.
14. Roberto L. Soza. Review of Downhole Dynamometer Testing [electronic resource]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (date of request 01.03.2021)
15. Lea JF, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis [electronic resource]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (date of request 17.03.2021).

Authors of the publication

Valeriy A. Manakhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 13.05.2021 г.

Отредактировано 31.05.2021 г.

Принято 11.06.2021 г.



БЕСКОНТАКТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ПРЕССОВКИ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В.Р. Басенко, О.В. Владимиров, И.В. Ившин, М.Ф. Низамиев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Цель данной работы - разработка бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса (ЛКИК) для вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора. В качестве измерительного элемента применяется лазерный виброметр, инструментом для обработки вибрационных сигналов служит разработанное программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW. Техническое состояние силового трансформатора анализируется по амплитудным спектрам вибрации бака исследуемого трансформатора, сформированным с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье в программном обеспечении LabVIEW.

МЕТОДЫ. Вибрационный метод контроля позволяет осуществлять контроль силового трансформатора во время его работы под напряжением, что позволяет перейти от плановой системы ремонтов трансформаторов к системе вывода в ремонт по текущему техническому состоянию.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработанный ЛКИК позволяет провести бесконтактные измерения параметров вибрации силового трансформатора под напряжением и установить текущий уровень прессовки обмоток и магнитопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный ЛКИК с программным обеспечением позволяет бесконтактно контролировать техническое состояние магнитопровода и обмоток силового трансформатора по амплитудно-частотным характеристикам параметров вибрации, а также использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов.

Ключевые слова: бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс; силовой трансформатор; параметры вибрации; контроль технического состояния; программное обеспечение LabVIEW; лазерный виброметр.

Для цитирования: Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 140-153. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153.

**CONTACTLESS LASER CONTROL AND MEASURING COMPLEX FOR
DETERMINING THE LEVEL OF WINDING PRESSURE AND MAGNETIC
CONDUCTOR OF POWER TRANSFORMER**

VR. Basenko, OV. Vladimirov, IV. Ivshin, MF. Nizamiev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *TARGET. The purpose of this work is to develop a non-contact laser control and measuring complex (LCMC) for vibration control of the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. A laser vibrometer is used as a measuring element, the developed software in the LabVIEW graphical programming environment serves as a tool for processing vibration signals. The technical condition of the power transformer is analyzed by the amplitude spectra of the vibration of the tank of the transformer under study, formed using the fast Fourier transform algorithm in the LabVIEW software.*

METHODS. The vibration control method makes it possible to control a power transformer during its operation under voltage, which makes it possible to move from a planned system of transformer repairs to a system for taking out for repair according to the current technical condition.

RESULTS. The developed LCMC allows to carry out non-contact measurements of vibration parameters of a power transformer under voltage and to establish the current level of pressing of windings and magnetic circuit.

CONCLUSION. The developed LCMC with software allows contactless control of the technical condition of the magnetic circuit and the windings of the power transformer according to the amplitude-frequency characteristics of the vibration parameters, as well as the use of statistical methods for processing and analyzing signals received from the transformer.

Keywords: *non-contact laser control and measuring complex; power transformer; vibration parameters; technical condition monitoring; LabVIEW software; laser vibrometer.*

For citation: Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF Contactless laser control and measuring complex for determining the level of winding pressure and magnetic conductor of power transformer. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):140-153. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153.

Введение

Эффективная работа силовых трансформаторов определяется надежной работой его элементов. Основными элементами силового трансформатора являются магнитопровод и обмотки, которые составляют его электромагнитную систему. Находясь под нагрузкой, трансформатор нагревается, что вызывает увеличение осевых усилий электромагнитной системы трансформатора. Помимо нагрузки на температурный режим трансформатора влияют условия окружающей среды и состояние изоляционной среды трансформатора. Соответственно, данные факторы влияют и на осевые усилия обмоток и магнитопровода. Для оценки осевых усилий электромагнитной системы трансформатора используется термин «прессовка». При изменении температуры обмоток и магнитопровода происходит изменение прессовки электромагнитной системы трансформатора, что приводит к снижению электродинамической стойкости элементов активной части силового трансформатора. Поэтому актуальным становится технический контроль за уровнем прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора. [1]

Наиболее эффективными методами, позволяющими контролировать уровень прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора, являются электрические и вибрационные методы. Но электрические методы не позволяют осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, в отличие от вибрационных методов, кроме того, преимуществом вибрационных методов являются высокая точность, чувствительность к зарождающимся и развивающимся дефектам, и возможность применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации. [2, 3]

Использование методов вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора требует ряд преобразований измеренного вибрационного сигнала. Лазерный контрольно-измерительный комплекс (ЛКИК) позволяет регистрировать параметры вибрации, полученных от контролируемого трансформатора, преобразовывать их в электрический сигнал прямо пропорционально виброскорости объекта контроля и формировать амплитудный спектр на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Подходящим инструментом для решения задач обработки вибрационного сигнала является программная среда *LabVIEW*, которая позволяет обрабатывать и анализировать результаты проведенных измерений.[2, 3]

Литературный обзор

С физической точки зрения вибрация силового трансформатора зависит от уровня прессовки его активной части. Снижение прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора во время его работы меняет общую картину вибрации трансформатора.

При этом уровень прессовки зависит от температуры активной части силового трансформатора. Изменение температуры обмоток трансформатора во время работы приводят к увеличению сил сжатия по отношению к заводским характеристикам прессовки трансформатора. Снижение нагрева обмоток сопровождается уменьшением осевых усилий сжатия обмоток. Зависимости осевых усилий от температуры обмоток представлены на диаграммах изменения осевых усилий обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения для трансформаторов ТРДН-40000/110 (рисунок 1).

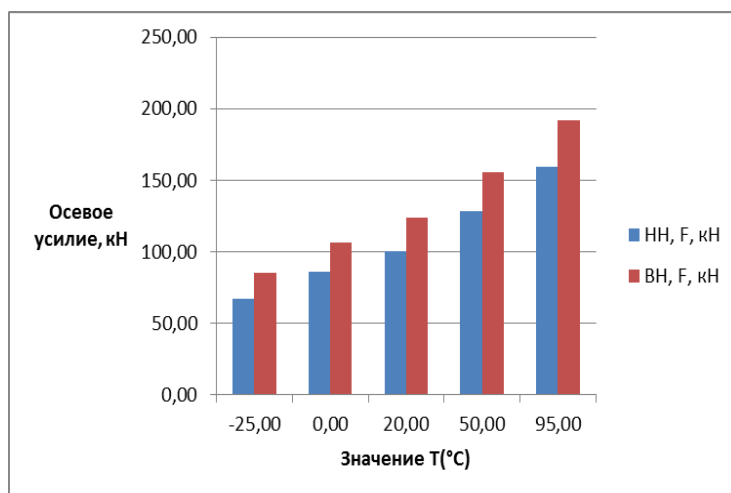


Рис. 1. Диаграмма изменения осевых усилий обмоток трансформатора марки ТРДН-40000/110

Fig. 1. Diagram of changes in the axial forces of the transformer windings of the TRDN-40000/110 brand

При температурах обмоток близких к 95°C осевые усилия возрастают на 15-20% от заводских значений. Данное повышение температуры является в пределах допустимых нагревов для трансформатора и не приводит к возникновению дефектов. Температуры около 50°C являются оптимальными для трансформатора, при данных температурах осевые усилия наиболее близки к заводским параметрам прессовки. Понижение температур в обмотках приводит к возникновению различных механических повреждений. Уменьшение

осевых усилий в обмотках при температуре -25°C приводят к возникновению смещений и деформаций в обмотках. Смещения и деформации обмоток опасны тем, что в результате их возникновения изменяются изоляционные промежутки, что в дальнейшем приводит к появлению дефектов и аварий в силовом трансформаторе. [4]. При этом необходимо понимать, что температурные режимы трансформатора связаны с его конструкцией, номиналом, рабочими режимами, типом изоляции, типом системы охлаждения. Все перечисленные факторы вносят определенный вклад и в вибрационную картину трансформатора и его элементов, и их влияние необходимо снизить.

Современные методы вибрационного контроля силовых трансформаторов дают возможность определить уровень прессовки обмоток и магнитопровода без вывода трансформатора из работы, определить снижение прессовки для каждой фазы и установить другие причины повышения вибрации трансформатора.

По результатам анализа работ авторов Тюрина А.Н., Баширова З.А., Долина А.П., [5, 6, 7] можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуды на частоте 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. [8]

В амплитудном спектре вибрации трансформатора в области частот меньших 100 Гц находятся вибрации, связанные с собственными вибрациями конструкции, либо же вибрации от систем охлаждения трансформатора, если таковые имеются. Частоты более 1000 Гц могут быть вызваны различными причинами, в частности для масляных трансформаторов данные вибрации связаны с колебательными процессами в масле, но, чаще всего, в диапазоне частот от 1000 Гц и выше вибрации обмоток и магнитопровода затухают, поэтому информативность данной области амплитудного спектра вибрации трансформатора очень низка. [8]

На сегодняшний день существуют системы, реализующие вибрационный контроль силовых трансформаторов. Системы вибрационного контроля, такие как «Веста» и «BALTECH», используют контактные датчики вибрации, которые обладают рядом существенных недостатков, влияющих на качество измерений. Данными недостатками являются:

- наличие неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- возникновение несовпадений АЧХ у однотипных датчиков;
- низкая повторяемость сигнала для датчика, находящегося на поверхности бака трансформатора, что приводит к высокому разбросу измерений вибрации;
- ограниченный температурный диапазон работы датчиков;
- трудоемкость процесса крепления датчика;
- влияние качества поверхности бака трансформатора (ровности, гладкости и чистоты) на сохранение широкого рабочего частотного диапазона;
- механический контакт «трансформатор – датчик» вызывает «ложные» сигналы, которые снижают качество измерений, что влияет на качество контроля трансформатора;
- небезопасность крепления датчиков на объекты повышенной опасности (под высоким напряжением).

Лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений.

ЛКИК для реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора

С целью реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора разработан и создан лазерный контрольно-измерительный комплекс. Схема разработанного ЛКИК показана на рисунке 2.

ЛКИК состоит из лазерного виброметра PDV – 100 - 1, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI USB – 6251 - 2, персонального компьютера - 3 и программного обеспечения - 4 на основе LabVIEW.



Рис. 2. Схема ЛКИК: 1 – лазерный виброметр PDV - 100; 2 – АЦП NI USB – 6251; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение LabVIEW; 5 – силовой трансформатор

Fig. 2. LKIK scheme: 1 - PDV-100 laser vibrometer; 2 – NI USB-6251 ADC; 3-personal computer; 4- LabVIEW software; 5-power transformer

Структурная блочная схема ЛКИК изображена на рисунке 3.

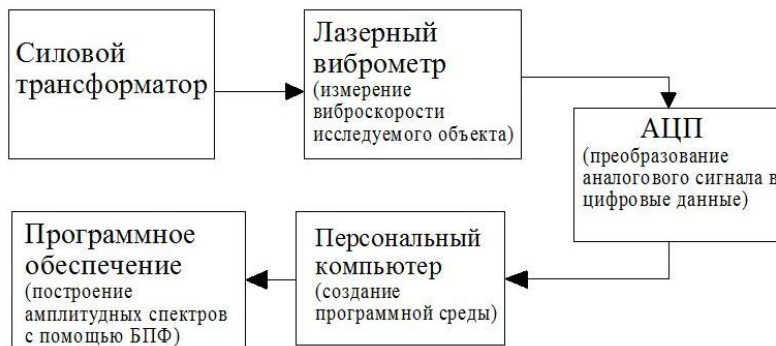


Рис.3. Структурная блочная схема ЛКИК

Fig. 3. Structural block diagram of the LCIC

Отличительной чертой разработанного ЛКИК является использование в качестве датчиков для измерений лазерных виброметров вместо традиционных контактных датчиков вибрации, которые позволяют производить бесконтактные измерения параметров вибрации силового трансформатора без подготовки поверхности бака трансформатора, в зоне повышенной опасности (силовой трансформатор) и в труднодоступных местах.[9]

Лазерный виброметр обладает следующими техническими характеристиками:

- диапазон частот измерения виброскорости – [0 Гц - 22 кГц];
- возможность цифровой обработки сигнала;
- выходы сигнала – аналоговый и цифровой;
- возможность измерения вибрации трансформатора на расстоянии от 0,1 до 30 метров (зависит от отражающей способности поверхности объекта);
- видимое и безопасное лазерное излучение (класс 2);
- низкое энергопотребление.

После проведения измерений на выходе виброметра формируется сигнал напряжения, который пропорционален мгновенному значению виброскорости силового трансформатора в точке измерения. После измерения вибрационный сигнал бака силового трансформатора преобразуется в цифровой вид с помощью модуля NI USB-6251, а затем анализируется в программном обеспечении на основе LabVIEW.[9]

Разработанное программное обеспечение состоит из следующих подпрограмм:

- подпрограммы «Формирования эталона»;
- подпрограммы «Сравнение эталоном».

Подпрограмма «Формирования эталона» создает эталонный амплитудный спектр вибрации исправного силового трансформатора и формирует доверительный интервал на основе рассчитанной доверительной вероятности. Эталонный спектр формируется из большого числа измерений силового трансформатора и включает в себя общие характеристики вибрации. При формировании эталонного спектра вибрации трансформатора применяется метод робастного взвешивания. В результате, сформированный эталон содержит в себе только характерные составляющие вибрации трансформатора для всех исследуемых амплитудных спектров и не содержит в себе случайные составляющие для отдельно взятого амплитудного спектра. Программа сравнения спектров с эталоном реализует сравнение и дает возможность определять отличия измеренных спектров вибрации от эталонного спектра трансформатора.

Подпрограмма работает по следующему алгоритму:

- открывается файл сформированного эталонного амплитудного спектра;
- из измеренных сигналов формируется текущий амплитудный спектр вибрации;
- вычисляются коэффициенты сравнения с использованием различных целевых функций для сформированных амплитудных спектров;
- производится определение коэффициентов сравнения относительно сформированных границ доверительного интервала.

При определении состояния прессовки обмоток (рисунок 4) применяется метод отбраковки аномалий: программное обеспечение определяет вычисленные значения коэффициентов сравнения в виде статистики ($p_1, p_2, \dots, p_m$), затем данное множество измеренных значений интерпретируется как некий абстрактный параметр. Далее, разработанное программное обеспечение, реализует следующий алгоритм [9]:

- происходит определение медианного значения $\bar{p}$;
- вычисляется разброс S в виде среднего абсолютного отклонения;
- строится доверительный интервал по формуле 1:

$$\bar{p} \pm S \cdot t \left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2 \right) \quad (1)$$

где $t(\alpha, m)$ - α -квантиль распределения Стьюдента со степенями свободы.

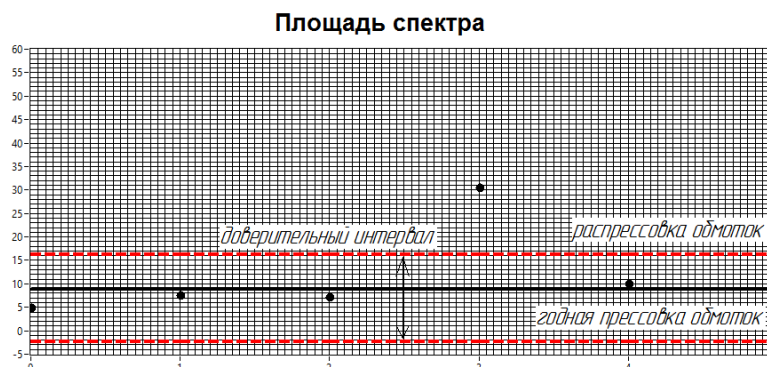


Рис. 4. Принцип принятия решения об уровне прессовки обмоток «годная-распрессовка» на основе целевой функции сравнения «Площадь спектра»

Fig. 4. The principle of making a decision on the level of pressing of windings "suitable-decompression" based on the objective comparison function "Spectrum area"

В том случае, когда коэффициенты сравнения расположены в пределах сформированного доверительного интервала, то уровень прессовки обмоток и магнитопровода признается «годным». Когда коэффициенты сравнения не попадают в пределы доверительного интервала, то обмотка и магнитопровод считаются «распрессованными».

Для амплитудных спектров вибрации трансформатора целевыми функциями сравнения являются:

- площадь спектра;
- коэффициент корреляции.

Функция сравнения «Площадь спектра» определяется как сумма значений амплитуд вибрации для дискретных частот по формуле 2:

$$S = \sum_{i=k}^n a_i, \quad (2)$$

где k – нижняя частота среза;

n – верхняя частота среза;

a_i – амплитуда колебаний на i – ой частоте.

Функция сравнения «Коэффициент корреляции» определяется расчетным путем по формуле 3:

$$r = \frac{\sum a_i a_{si} - (\sum a_i \sum a_{si}) / n}{\sqrt{(\sum a_i^2 - (\sum a_i)^2 / n) \cdot (\sum a_{si}^2 - (\sum a_{si})^2 / n)}}, \quad (3)$$

где a_i – амплитуда на i -ой частоте текущего спектра;

a_{si} – амплитуда на i -ой частоте эталонного спектра;

n – количество частот в спектре, сравниваемых с эталоном.

В программном обеспечении осуществлена возможность анализа амплитудных спектров силового трансформатора с помощью целевых функций на информативных участках, характеризующих «распрессованное» состояние обмотки и магнитопровода трансформатора. Для силовых трансформаторов информативным диапазоном частот при проведении измерений под нагрузкой будут частоты от 100 Гц до 1000 Гц, так амплитуды вибрации в данном частотном диапазоне возникают под воздействием токов, протекающих в обмотках трансформатора.

Таким образом, используя разработанное программное обеспечение, можно произвести анализ уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Результаты

С помощью разработанного ЛКИК проведены экспериментальные исследования параметров вибрации работающего силового трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ. При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 3 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были установлены следующие характеристики:

- границы диапазона частот от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44,1 кГц.

Регистрация параметров вибрационного сигнала проводилась в 6 точках трансформатора. Данные точки измерений расположены на баке трансформатора и соответствуют верхней и нижней границе его обмоток. Схема месторасположения данных точек показана на рисунке 5 и соответствует системе контроля «Веста» ООО «Димрус» качества прессовки обмоток и стали трансформаторов.

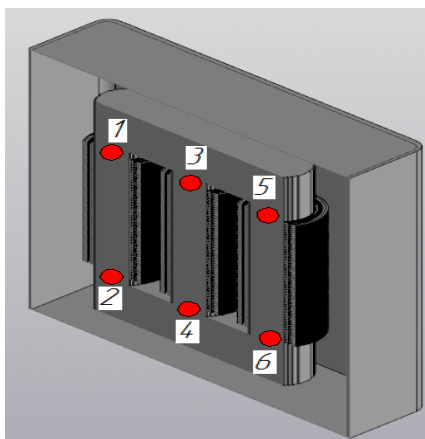


Рис. 5. Упрощенная 3D модель соответствия точек измерения точкам на обмотках трансформатора ТМН 6300 35/10 кВ

Fig. 5. Simplified 3D model of the correspondence of measurement points to points on the windings of the TMN 6300 35/10 kV transformer

Точки 1,3,5 и 2,4,6 являются верхними и нижними границами обмоток фаз А, В, С соответственно, перенесенными на бак трансформатора.

Результаты измерений всех 6 точек обработаны в программном обеспечении разработанного ЛКИК. На рисунке 6 представлена амплитудно - временная характеристика вибрации бака трансформатора в точке 1 (фаза А).

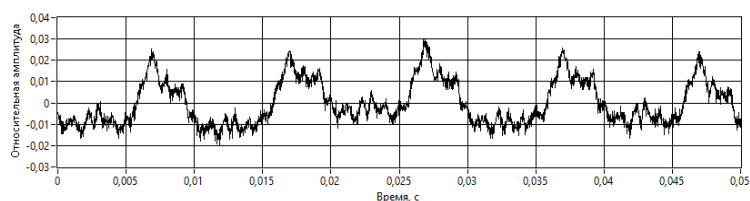


Рис.6. Амплитудно-временная характеристика колебаний трансформатора в точке 1, верх фазы А

Fig. 6. The amplitude-time characteristic of the transformer oscillations at point 1, the top of phase A

На временном интервале от 0 до 0,5 с сформированы амплитудные спектры виброскорости для фаз А, В, С в верхних и нижних точках (рисунок 7-9).

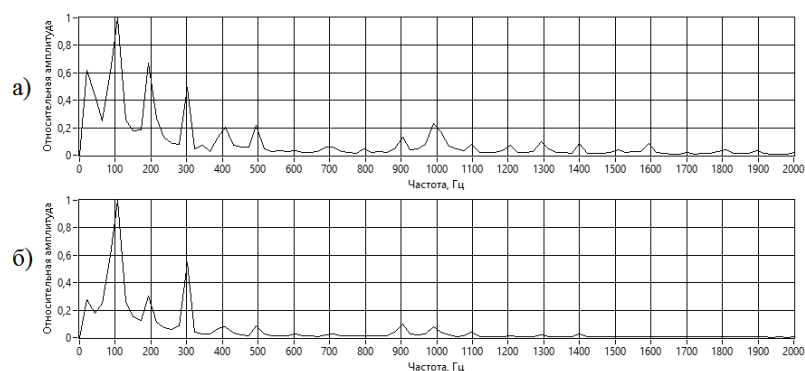


Рис. 7. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы А; б) нижней точки фазы А

7. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: а) the upper point of phase A; б) the lower point of phase A

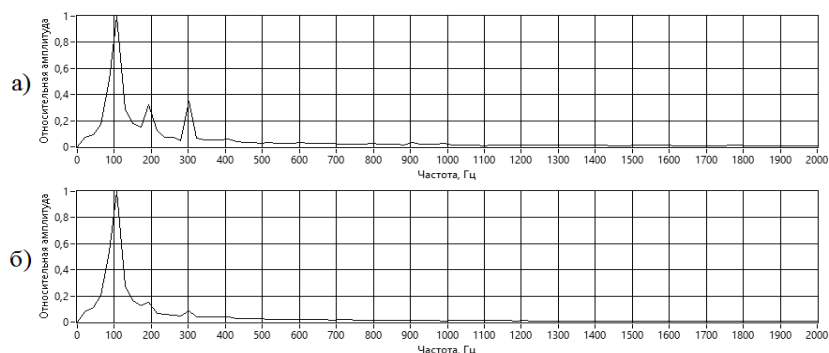


Рис. 8. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы В; б) нижней точки фазы В

Fig. 8. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: a) the upper point of phase B; b) the lower point of phase B

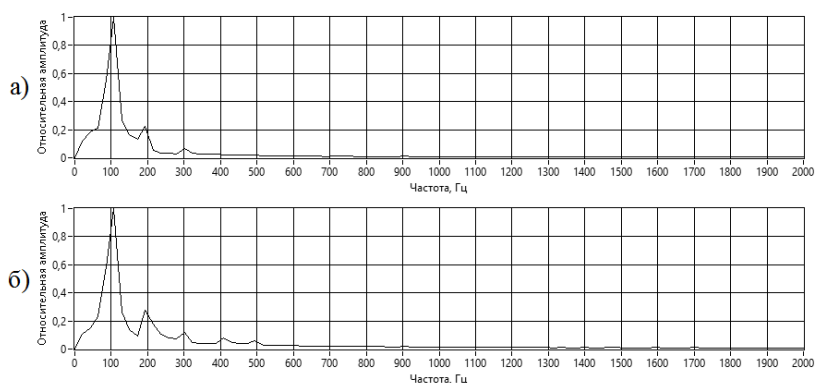


Рис. 9. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы С; б) нижней точки фазы С

Fig. 9. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: a) the upper point of phase C; b) the lower point of phase C

В качестве эталонного амплитудного спектра принят спектр, сформированный из сигналов, полученных с двух работоспособных трансформаторов марки ТМН 6300 35/6 кВ, находящихся в эксплуатации более 35 лет, в 12 точках (по 6 с разных сторон трансформатора) (рисунок 5). Внешний вид эталонного спектра представлен на рисунке 10.

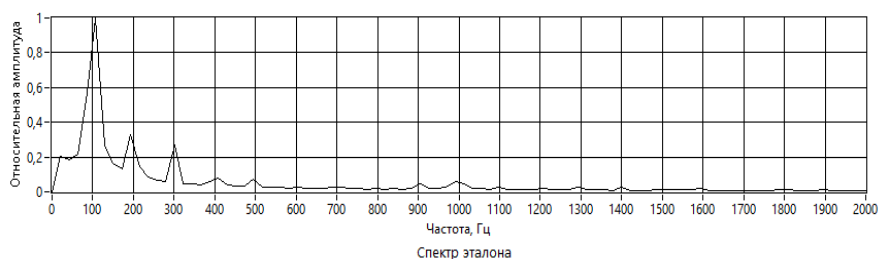


Рис. 10. Эталонный амплитудный спектр

Fig. 10. Reference amplitude spectrum

С целью апробации ЛКИК и определения уровня прессовки обмоток трансформатора произведено сравнение спектров виброскорости во всех точках с эталонным в информативном диапазоне частот от 100 Гц до 1000 Гц с использованием 2-х целевых функций:

- площадь спектра;
- коэффициент корреляции.

Результаты сравнения по целевой функции «Площадь спектра» приведены на рисунке 11.

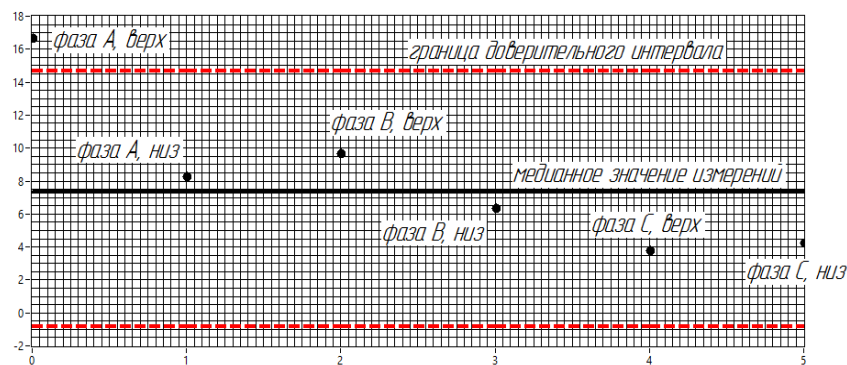


Рис. 11. Сравнение амплитудных спектров в каждой точке измерений с эталонным спектром по целевой функции «Площадь спектра»

Fig. 11. Comparison of the amplitude spectra at each measurement point with the reference spectrum by the objective function "Spectrum area"

Значения целевой функции «Площадь спектра» для всех точек, кроме верхней точки фазы А, находится в пределах значения доверительного интервала построенного с уровнем доверительной вероятности 0,95, что говорит о допустимом уровне прессовки обмоток трансформатора. Значение площади спектра $S = 16,8$ верхней точки фазы А, выше границы доверительного интервала. Данное значение вышло за пределы доверительного интервала в результате появления дополнительных амплитуд вибрации верхней точки фазы А на частотах 400, 500, 900 и 1000 Гц, что говорит о возможной распрессовки верхней части обмотки фазы А на уровне ~10%.

Также с помощью целевой функции сравнения площадь спектра можно определить аномальную вибрацию, связанную с дефектом трансформатора. В этом случае характеристика сравнения «Площадь спектра» выйдет за пределы верхнего или нижнего доверительного интервала, что будет показателем аномального спектра.

Результаты сравнения по целевой функции «Коэффициент корреляции» приведены на рисунке 12.

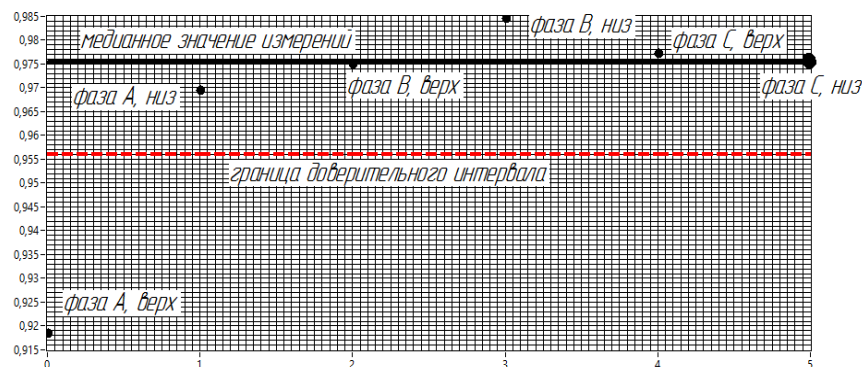


Рис. 12. Сравнение амплитудных спектров в каждой точке измерений с эталонным спектром по целевой функции «Коэффициент корреляции»

Fig. 12. Comparison of the amplitude spectra at each measurement point with the reference spectrum according to the objective function "Correlation coefficient"

Функция «коэффициент корреляции» для верхней точки фазы А получилась $r=0,919$, что находится ниже минимального значения границы доверительного интервала $r=0,956$, построенного с уровнем доверительной вероятности 0,95, и говорит о возможной «распрессовке» верхней части обмотки фазы А на уровне ~10%.

Данное значение распрессовки является не значительным, но говорит о наличии заражающегося механического дефекта обмотки фазы А исследуемого трансформатора.

Совпадение результатов сравнения по двум характеристикам подтверждает достоверность анализа уровня прессовки обмоток, проведенного с помощью разработанного ЛКИК.

Выводы

1. Разработан ЛКИК для реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки активной части силового трансформатора с применением бесконтактных методов лазерной виброметрии.

2. Разработано программное обеспечение ЛКИК, с помощью которого реализуется метод вибрационного контроля с применением бесконтактных методов лазерной виброметрии.

3. Разработанный ЛКИК с программным обеспечением позволяет:

- бесконтактно контролировать уровень прессовки активной части силового трансформатора по амплитудным спектрам вибрации бака трансформатора;

- анализировать амплитудные спектры эталонного и контролируемого трансформатора с помощью различных характеристик сравнения, на выбранных информативных участках спектра вибрации, характеризующей наличие дефекта в объекте контроля;

- использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов;

- применять компьютерные технологии в задачах контроля уровня прессовки активной части силового трансформатора.

4. С помощью разработанного ЛКИК:

- проведены экспериментальные исследования по регистрации параметров вибрации силового трансформатора ТМН 6300 кВА 35/6;

- построены амплитудно-временные и амплитудно-частотные характеристики виброскорости в 6 точках бака трансформатора, характеризующие уровень прессовки активной части силового трансформатора;

- установлены информативные частоты виброскорости бака трансформатора: 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц, 500 и 900 Гц (частоты кратные 100 Гц).

- определено снижение уровня прессовки части обмотки фазы А трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ в ~10 %, что говорит о начальной стадии возникновения механического дефекта обмотки.

5. Разработанный ЛКИК апробирован в результате экспериментальных исследований и подтвердил свою работоспособность по определению уровня прессовки обмотки и магнитопровода силового трансформатора.

Литература

1. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов // Димрус Пермь: 2015. С. 60.

2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования // Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. 2020. С. 297-300

3. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., и др. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика 2015. С.18–25

4. Лазарев И. В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов // Динамика и прочность машин. 2014. С.12-18

5. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., et al. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods // 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) 44894 Proceedings. 2018. V. 1, Part 5. P. 320-325.

6. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects // Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, V. 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

7. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020». 2020. С.26.

8. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации // Вестник Чувашской ГСХА, №2, 2018, С.108-111

9. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. 2014. №Т.1 С. 151-152.

10. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 // Известие вузов. Проблемы энергетики № 5 Казань: КГЭУ, 2019, С. 141-151.

11. Kurtz C., Ford G., Vainberg M., et al Managing aged transformers // Transmission & Distribution World. 2005, July. P. 36–45.

12. Metwally I.A. Failures, monitoring, and new trends of power transformers // IEEE potentials. 2011, May/June. P. 36–43.

13. Theil G. Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies // Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

14. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известие вузов. Проблемы энергетики № 7-8. Казань: КГЭУ, 2017, С. 71-77

15. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // Известие вузов. Проблемы энергетики № 3 Казань: КГЭУ, 2020, С. 78-89

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gavrilenko AV, Dolin AP. *Quality control system for pressing the windings and steel*

of transformers by measuring vibration, monitoring the state of oil pumps. Dimrus - Perm: 2015. P. 60.

2.Nizamiev MF, Ivshin IV. *Control of the technical condition of electrical equipment // Energy security*. Collection of scientific articles of the III International Congress. 2020. P. 297-300

3. Nizamiev MF, Ivshin IV., Maksimov VV, et al. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. *Electrica*. 2015. P.18–25

4. Lazarev IV. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer when pressing windings, changing the temperature and moisture content of insulating materials. *Dynamics and Strength of Machines*. 2014. P.12-18

5.Ivshin IV, Nizamiev MF., Vladimirov OV, et al. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods. 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)-44894 Proceedings. 2018;1(5):320-325.

6.Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research*. 2018;8(1):322-333.

7.Basenko VR, Nizamiev MF. Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex. *Energy-2020*. 2020. P.26

8.Rybakov LM. Methods and methods for assessing the state of power transformers during operation. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*. 2018;2:108-111.

9.Nizamiev MF. *Analysis of methods for studying the vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape*. 2014;1: 151-152.

10.Nguyen Tien, Gilfanov K.Kh. Thermal modeling of the TM-160/10 oil-filled power transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*.2019;5:141-151.

11.Kurtz C, Ford G, Vainberg M, et al. Managing aged transformers. *Transmission & Distribution World*. 2005, July. P. 36–45.

12.Metwally IA. *Failures, monitoring, and new trends of power transformers*. IEEE potentials. 2011, May / June. P. 36–43.

13.Theil G. *Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies*. Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

14.Gracheva EI, OV. Naumov, EA. Fedotov Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. Kazan: KSPEU. 2017,7-8:71-77.

15.Mustafin RG, Yarysh RF. Differential method for detecting turn short circuits in a three-phase transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2020;3: 78-89. Kazan: KSPEU.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено ***26.04.2021 г.***

Отредактировано ***12.05.2021 г.***

Принято ***03.06.2021 г.***



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА «ПОДУШКИ» ПОД ФУНДАМЕНТ КТП 10/0,4 КВ КИОСКОВОГО ТИПА

М.В. Бородин¹, С.Ю. Захаров², Р.П. Беликов¹, В.И. Бобровский³

¹Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орел,
Россия

²Филиал ПАО «МРСК Центра и Приволжья»-«Тулэнерго», г. Тула, Россия

³Филиал ПАО «МРСК Центра-«Орелэнерго», г. Орел, Россия

energy@orelsau.ru, Zaharov.SY@tl.mrsk-cp.ru

Bobrovskii.vi@mrsk-1.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определить количество реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ, рассмотреть усовершенствованную технологию монтажа «подушки» под фундамент КТП 10/0,4 кВ киоскового типа и определить время, затраченное на его монтаж. МЕТОДЫ. В статье представлены анализ данных о количестве реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ и алгоритм выполнения монтажа усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП 10/0,4 кВ киоскового типа. РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе проведения эксперимента по монтажу усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП было определено время выполнения работ. Суммарное затраченное время на возведение усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП киоскового типа составило 580 минут, что составляет чуть более 9,5 часов. Также предложено нормируемое время выполнения работ при монтаже усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП киоскового типа. ВЫВОДЫ. Использование представленных в статье данных о количестве реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ позволит ученым и специалистам разрабатывать и предлагать новые способы реконструкции и технологии строительства различных ТП, а так же определять экономическую эффективность новых фундаментов для ТП. Описанная в статье технология монтажа фундамента КТП киоскового типа позволит не только повысить эксплуатационные характеристики КТП, но и обеспечит пожарную безопасность смонтированного оборудования. Техническое решение, указанное в статье, может применяться при реконструкции и строительстве КТП 10/0,4 кВ киоскового типа. Предложенный алгоритм монтажа усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП киоскового типа является универсальным, так как он может использоваться на КТП различной мощности.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция; фундамент; технология; безопасность; надежность.

Для цитирования: Бородин М.В., Захаров С.Ю., Белико Р.П., Бобровский В.И. Усовершенствование технологии монтажа «подушки» под фундамент КТП 10/0,4 кВ киоскового типа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 154-167. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-154-167.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF INSTALLATION OF «PILLOWS» UNDER THE FOUNDATION OF CTS 10 / 0.4 KV KIOSK TYPE

MV. Borodin¹, SYu. Zakharov², RP. Belikov¹, VI. Bobrovsky³

¹Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhina, Oryol, Russia

²Branch of IDGC of Center and Volga Region, IRGC - Tulenergo, Tula, Russia

³Branch of IDGC of Center, IRGC - Orelenergo, Orel, Russia

energy@orelsau.ru, Zaharov.SY@tl.mrsk-cp.ru

Bobrovskii.vi@mrsk-1.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To determine the number of reconstructed, newly installed and replaced 10 / 0.4 kV transformer substations, consider an improved technology for installing a "pillow" under the foundation of a kiosk-type 10 / 0.4 kV transformer substation and determine the time spent on its installation. *METHODS.* The article presents an analysis of data on the number of reconstructed, newly installed and replaced 10 / 0.4 kV transformer substations, an algorithm for installing an improved "pillow" under the foundation of a 10 / 0.4 kV kiosk-type transformer substation. *RESULTS.* In the course of the experiment on the installation of an improved "pillow" under the foundation of the CTS, the time of work was determined. The total time spent on the construction of an improved "pillow" under the foundation of a kiosk-type CTS was 580 minutes, which is just over 9.5 hours. Also the standardized time of work during the installation of an improved "pillow" under the foundation of a kiosk-type CTS. Also, the standardized time for performing work during the installation of an improved "pillow" under the foundation of a kiosk-type package transformer substation has been proposed. *CONCLUSIONS.* The use of the data presented in the article on the number of reconstructed, newly installed and replaced 10 / 0.4 kV transformer substations will allow scientists and specialists to develop and propose new methods of reconstruction and construction technologies for various transformer substations, as well as determine the economic efficiency of new foundations for transformer substations. The technology of kiosk-type CTS foundation installation described in the article will allow not only to increase the operational characteristics of the CTS, but also ensure the fire safety of the installed equipment. The technical solution specified in the article can be used during the reconstruction and construction of a 10 / 0.4 kV kiosk-type package transformer substation. The proposed algorithm for mounting an improved "pillow" under the foundation of a kiosk-type package transformer substation is universal, since it can be used at a package transformer substation of various capacities.

Key words: transformer substation; foundation; technology; safety; reliability.

For citation: Borodin MV, Zakharov SYu, Belikov RP, Bobrovsky VI. Improvement of the technology of installation of «pillows» under the foundation of CTS 10 / 0.4 kV kiosk type. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):154-167. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-154-167.

Введение и литературный обзор

Для электроснабжения потребителей различных категорий надежности применяются комплектные трансформаторные подстанции (КТП) киоскового типа. Их производство осуществляют различные компании, а монтаж и реконструкцию производят подрядные организации либо персонал электросетевой компании. К КТП киоскового типа предъявляется множество требований, одним из обязательных требований, обеспечивающих штатный режим работы КТП, является его фундамент. Формирование надежного фундамента обеспечивает необходимую устойчивость конструкции КТП, в том числе во время климатических изменений и эксплуатации электроустановки. Технология возведения основания определяется характеристиками оборудования (габаритными размерами, весом, назначением и т.д.), а также свойствами грунта в месте размещения.

Согласно действующим типовым проектам КТП киоскового типа мощностью от 25 до 630 кВА должны устанавливаться на фундамент незаглубленного типа, состоящий из строительных фундаментных блоков сплошного сечения (ФБС). На практике для размещения КТП киоскового типа достаточно точечной укладки двух ФБС под каждый угол конструкции. Если планируется размещение двухтрансформаторной подстанции, то принимающая способность фундамента должна быть увеличена, при этом в большинстве случаев количество ФБС увеличивается в два раза. Хочется отметить, что так же на практике в настоящее время применяется фундамент под КТП, формируемый из металлических лежней. Это старая технология, но она используется в случае необходимости более быстрого возведения КТП.

Одним из наиболее проработанных (с точки зрения строительной части и технологии устройства «подушки» под фундамент КТП) является конструктив, указанный в действующем типовом проекте¹. Несмотря на достаточно качественную подготовку «подушки» под фундамент, указанную в проекте, данный способ, а также чертежи во всех

¹ ОТП.С.03.61.01-93 «Комплектная трансформаторная подстанция напряжением 10/0,4 кВ мощностью от 250 до 400 кВА проходного типа» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.likeproject.ru/tippr_ktp.php?action=file_selection&id=10 (дата обращения 30.03.2021г)

остальных действующих типовых проектах, не учитывают обработку площадки под КТП и вокруг нее от нежелательной растительности, которая в течение очень короткого периода времени после монтажа появляется на верхнем слое щебня (или гравия). Следовательно, через определенный период времени (год или два), фундамент вокруг КТП зарастает свежей порослью травы или кустарника, что создает трудности для последующего доступа в КТП. В весеннее время высохшая трава (либо кустарник) создает пожароопасную ситуацию вокруг КТП и, в случае поджога, это может привести к неблагоприятным последствиям для оборудования. Типичные случаи зарастания КТП 10/0,4 кВ киоскового типа порослью травы представлены на рисунке 1.

Основные требования к фундаменту КТП указаны в ² и направлены на повышение безопасности и энергосбережения в процессе строительства и эксплуатации фундамента КТП. При строительстве фундамента КТП подрядчики электросетевых компаний зачастую экономят на строительных материалах. При этом экономия на фундаменте КТП определить очень трудно, так как приемка КТП в эксплуатацию осуществляется визуально с использованием проектно-сметной документации. Невыявленное нарушение фундамента КТП может привести к отключению потребителя, что, в свою очередь, является негативным фактором для электросетевой компании. Кроме этого, существующие способы строительства фундаментов не стоят на месте и всегда развиваются, и их можно и нужно использовать при строительстве фундамента КТП киоскового типа. Но при строительстве фундамента КТП с применением новых технологий необходимо совмещать технические запросы электросетевой компании и не допустить удорожания проекта.



Рис. 1 Зарастание КТП 10/0,4 кВ киоскового типа порослью травы

Fig. 1 Overgrowth of KTP 10/0. 4 kV kiosk-type overgrowth of grass

Анализируя литературные источники [1-5] и интернет сайты производителей КТП, монтажных организаций, выявлено, что в них не представлены новые предложения и способы, направленные на усовершенствование технологии монтажа «подушки» под фундамент КТП, поэтому решаемая в статье проблема является актуальной. Также анализируя вышеуказанные источники, было определено, что в них отсутствуют данные о количестве трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ, реконструированных и установленных вновь и о случаях замены фундамента КТП и т.д. В свою очередь, данная информация позволила бы ученым разрабатывать и предлагать новые способы реконструкции и технологии строительства фундамента КТП, а также определять экономическую эффективность новых фундаментов для КТП.

Немаловажной составляющей при строительстве «подушки» под фундамент КТП является время, затраченное на ее возведение, при этом в литературных источниках [6-9] данные о затраченном времени отсутствуют. Это в свою очередь является недостатком, так как организация, осуществляющая строительство «подушки» под фундамент КТП, не может точно спрогнозировать введение в эксплуатацию КТП. Так же на время строительства влияет множество факторов, например, погодные условия, тип почвы,

² СП 22.13330-2016 «Основания зданий и сооружений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения 31.03.2021г)

квалификация персонала, обеспеченность современным инвентарем и т.д. Поэтому исследование, направленное на определение времени, затрачиваемого на возведение «подушки» под фундамент КТП, имеет важное практическое значение.

Материалы и методы

Авторами в трудах [10-12] указывается, что в филиале публичного акционерного общества «Межрегиональная распределительная сетевая компания Центра-«Орелэнерго» (далее филиал ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго») большое значение уделяют проблеме использования новых технологий, направленных на повышение пожарной безопасности электроустановок компании и надежности электроснабжения потребителей. Так же авторами [13-15] отмечается, что немаловажное значение для электросетевых компаний России имеет время, затраченное на производство различных видов работ персоналом компании и подрядными организациями. То есть, филиал ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго» заинтересован в минимизации вышеуказанных недостатков. Поэтому в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго» был произведен эксперимент по усовершенствованию технологии монтажа «подушки» под фундамент КТП киоскового типа мощностью 400 кВА. Эксперимент проводился по следующему алгоритму:

- осуществлялась выборка растительного слоя на 150 мм и последующая планировка грунта на площадке, где планировался монтаж КТП киоскового типа;
- подготавливалась утрамбованная песчаная подушка;
- утрамбованный песок застилался геотекстилем плотностью не менее 300 г/м²;
- по размеченным отметкам монтировался каркас под обшивку фундамента;
- подготовленная площадка засыпалась щебнем крупной фракции;
- отсыпанный в пределах каркаса щебень выравнивался, затем на него по уровню были выставлены фундаментные блоки;
- качество установки фундаментных блоков фиксировалось комиссией;
- на подготовленный в соответствии с требованиями проекта фундамент устанавливался корпус КТП киоскового типа;
- после установки КТП на фундамент для повышения пожарной безопасности, защиты бетонных конструкций от воздействия атмосферных осадков, предотвращения засорения щебня песком и семенами растений, переносимых ветром, а также придания ему эстетичного и ухоженного вида, фундаментные блоки были защищены профильным листом;
- на уже подготовленный каркас из трубы прямоугольного профиля монтировалась рама, к которой прикреплялся профлист;
- рама зашивалась профлистом корпоративного цвета;
- верх получившейся конструкции зашивался гладкими листами, которые крепились к нижней части корпуса КТП и соединялись между собой с помощью саморезов.

Время, затрачиваемое на возведение КТП киоскового типа, с предлагаемой усовершенствованной «подушкой» под фундамент, определялось по формуле:

$$T_{\text{уст.под.КТП}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} \quad (1)$$

где:

$T_{\text{уст.под.КТП}}$ – время, затрачиваемое на возведение КТП киоскового типа, с предлагаемой усовершенствованной «подушкой» под фундамент, мин.

t_1 – время, затраченное на выборку растительного слоя и последующей планировки грунта на площадке под КТП, мин;

t_2 – время, затраченное на утрамбовку песчаной подушки, мин;

t_3 – время, затраченное на застилку геотекстилем песчаной подушки, мин;

t_4 – время, затраченное на монтаж каркаса под обшивку фундамента, мин;

t_5 – время, затраченное на засыпку щебнем крупной фракции подготовленной площадки, мин;

t_6 – время, затраченное на выставление фундаментных блоков по уровню, мин;

t_7 – время, затраченное комиссией на фиксацию качества установки фундаментных блоков, мин;

t_8 – время, затраченное на установку корпуса КТП киоскового типа на фундаментные блоки, мин;

t_9 – время, затраченное на монтаж защиты фундаментных блоков, мин;

t_{10} – время, затраченное на монтаж рамы для профлиста, мин;

t_{11} – время, затраченное на монтаж профлиста, мин.

Анализ данных о количестве реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ производился с применением методов математической статистики.

Результаты и обсуждения

С целью получения актуальной информации о количестве реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ был произведен анализ данных, предоставленный филиалом ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго». Результаты проведенного анализа представлены на рисунке 2.

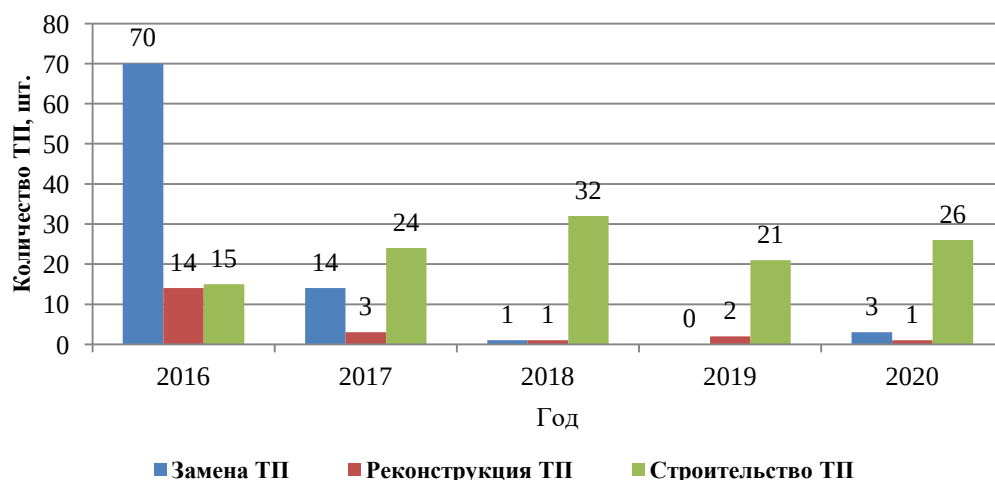


Рис. 2 Количество реконструированных, установленных вновь и замененных ТП в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго»

Fig. 2 The number of reconstructed, newly installed and replaced TP in the branch of IDGC of Center-Orelenargo

Результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что в 2016 году наблюдается наибольшее количество замененных ТП 10/0,4 кВ, при этом количество вновь установленных не значительно превышает количество реконструированных ТП. Большое количество замененных ТП обусловлено стратегией филиала ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго», направленной на повышение надежности электроснабжения потребителей и снижения потерь электроэнергии. В период с 2017 года по 2020 год наблюдается увеличение количества вновь установленных ТП по отношению к 2016 году. Это, прежде всего, связано с развитием и увеличением предприятий Орловской области. При этом хочется отметить, что в вышеуказанный период производилось значительно меньшее количество реконструкций и замен ТП. За анализируемые годы было реконструировано 21 ТП, заменено 88 ТП и построено вновь 118 ТП.

Далее было определено процентное соотношение количества реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ с 2016 по 2020 год в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго». Результаты анализа представлены на рисунке 3.

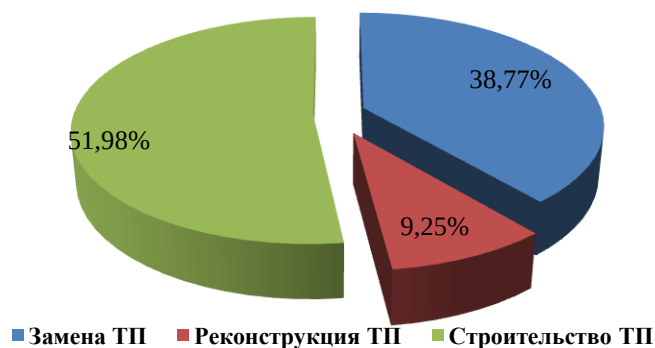


Рис. 3. Процентное соотношение количества реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго»

Fig. 3. Percentage ratio of the number of reconstructed, newly installed and replaced 10/0. 4 kV TP in the branch of IDGC of Center PJSC-Orelenargo

По результатам, представленным на рисунке 3, можно сделать вывод, что количество

реконструированных ТП 10/0,4 кВ значительно меньше количества замененных и вновь построенных ТП, при этом количество замененных ТП меньше на 13,21%, чем вновь построенных ТП. Хотя, анализируя рисунок 2, может сложиться мнение, что количество замененных ТП значительно больше, чем реконструированных и вновь построенных, но если проанализировать данные за пять лет, то наблюдается обратная тенденция. Это прежде всего связано с тем, что в 2016 году количество реконструированных и замененных ТП значительно превышает количество вновь построенных.

Так же был произведен анализ реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго» в зависимости от мощности ТП. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Количество и мощность ТП 10/0,4 кВ реконструированных, установленных вновь и замененных в филиале ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго»

Наименование работ	Мощность ТП 10/0,4 кВ, кВА						
	25	63	100	160	250	400	630
2016 год							
Замена ТП, шт.	-	5	16	23	23	3	-
Реконструкция ТП, шт.	-	4	5	1	1	3	-
Строительство ТП, шт.	-	1	3	4	6	1	-
2017 год							
Замена ТП, шт.	-	1	2	6	3	2	-
Реконструкция ТП, шт.	-	3	-	-	-	-	-
Строительство ТП, шт.	4	16	2	2	-	-	-
2018 год							
Замена ТП, шт.	-	-	-	1	-	-	-
Реконструкция ТП, шт.	-	-	-	-	1	-	-
Строительство ТП, шт.	5	14	6	5	2	-	-
2019 год							
Замена ТП, шт.	-	-	-	-	-	-	-
Реконструкция ТП, шт.	-	1	1	-	-	-	-
Строительство ТП, шт.	2	15	1	1	1	1	1
2020 год							
Замена ТП, шт.	-	1	1	1	-	-	-
Реконструкция ТП, шт.	-	1	-	-	-	-	-
Строительство ТП, шт.	5	16	2	2	0	1	-

Результаты, представленные в таблице 1, демонстрируют увеличение количества установленных ТП мощностью 25 кВА. За рассматриваемые года, больше всего было заменено ТП мощностью 160 кВА, при этом количество заново построенных составило 14 штук. Больше всего было построено и введено в эксплуатацию ТП мощностью 63 кВА. Не реконструировались и не заменялись ТП мощностью 630 кВА, так как в Орловской области преобладающее количество ТП такой мощности находится на балансе различных не электросетевых предприятиях.

Результаты, представленные на вышеуказанных рисунках и таблице, показывают, что большое количество ТП в электросетевых компаниях заменяется и реконструируется, поэтому решение задачи указанной во введении, связанной с «подушкой» под фундамент КТП киоскового типа, является довольно актуальной. А ее решение за счет выполнения только соответствующих эксплуатационных работ, как показала практика, достаточно затруднительно и трудоемко.

В связи с вышеуказанным предлагаем усовершенствовать технологию монтажа

«подушки» под фундамент КТП киоскового типа, которая предусматривает исключение появления растительности под фундаментными блоками, самим КТП и на определенном расстоянии вокруг него. При этом предотвращение роста нежелательной поросли может быть достигнуто путем применения в качестве одного из слоев «подушки» геотекстильного полотна плотностью не менее 300 г/м². Данный материал широко применяется в электросетевом (при монтаже открытых распределительных устройств подстанций) и дорожном строительстве. Повышение пожарной безопасности вокруг КТП предлагается обеспечить за счет «обшивки» фундамента КТП профильным листом с плотным примыканием верха конструкции к корпусу КТП.

Таким образом, с учетом вышесказанного, усовершенствованная технология монтажа фундамента под КТП киоскового типа выглядит следующим образом:

1. Осуществляется выборка растительного слоя на 150 мм, как показано на рисунке 4, и последующая планировка грунта на площадке, где планируется монтаж КТП.



а)



б)

Рис. 4 Фото выборки растительного слоя и планировки грунта на площадке под строительство КТП

- а) Фото выборки растительного слоя под строительство КТП;
б) Фото планировки грунта на площадке под строительство КТП.

Fig. 4 Photo of the sample of the vegetation layer and the ground layout on the site for the construction of the CTP

- a) Photo of the sample of the vegetation layer for the construction of the CTP;
b) Photo of the ground layout on the site for the construction of the CTP.

2. Подготавливается, как показано на рисунке 5, утрамбованная песчаная подушка, при этом песок либо проливается водой, либо может применяться виброплита.



Рис. 5 Утрамбованная песчаная подушка

Fig. 5 Rammed sand cushion

3. На утрамбованный песок застилается геотекстиль плотностью не менее 300г/м². Использование геотекстиля не дает возможность в дальнейшем расти траве под КТП и препятствует оседанию щебня в песок в течение всего срока эксплуатации фундамента КТП. Результат укладки геотекстиля представлен на рисунке 6.



Рис. 6 Фото укладки геотекстиля

Fig. 6 Photo of geotextile laying

4. По размеченным отметкам (рисунок 4б) монтируется каркас под обшивку фундамента. При этом для придания симметричного вида итоговой конструкции фундамента каркас должен отступать от каждого края КТП на одинаковое расстояние. Подготовленная площадка засыпается щебнем крупной фракции. При этом геотекстильное полотно желательно «выпустить» за пределы каркаса на 30-40 см, что также предотвратит последующий рост поросли вокруг КТП. Реализация вышеуказанного представлена на рисунке 7.



Рис. 7 Фото монтажа каркаса фундамента КТП

Fig. 7 Photo of the installation of the KTP foundation frame

5. Отсыпанный в пределах каркаса щебень выравнивается, затем на него по уровню выставляются фундаментные блоки (рисунок 8). Качество установки фундаментных блоков должно быть зафиксировано комиссией.



Рис. 8 Установка фундаментных блоков для КТП

Fig. 8 Installation of foundation blocks for KTP

6. На подготовленный в соответствии с требованиями проекта фундамент, устанавливается корпус киосковой КТП. Монтаж установки представлен на рисунке 9.



Рис. 9 Установка корпуса КТП

Fig. 9 Installation of the KTP enclosure

7. Для повышения пожарной безопасности, защиты бетонных конструкций от воздействия атмосферных осадков, предотвращения засорения щебня песком и семенами растений, переносимых ветром, а также придания ему эстетичного и ухоженного вида, установленные фундаментные блоки «зашиваются» профильным листом с плотным примыканием верха конструкции к корпусу КТП. Вышеуказанное техническое решение выполнялось по следующей последовательности:

7.1. На уже подготовленный каркас из трубы прямоугольного профиля монтируется «рама», к которой будет крепиться профлист. Результат монтажа «рамы» представлен на рисунке 10.



Рис. 10 Фото смонтированной рамы

Fig. 10 Photo of the mounted frame

7.2. По периметру фундамента «рама» зашивается профлистом корпоративного цвета. Крепление профлиста желательно осуществлять только кровельными саморезами. Верх получившейся конструкции зашивается гладкими листами, которые крепятся к нижней части корпуса КТП и соединяются между собой также с помощью саморезов. Полученный результат представлен на рисунке 11.



а)



б)

Рис. 11 Результат монтажа профлиста «рамы»

- а) Фото монтажа профлиста нижней части «рамы»;
- б) Фото монтажа профлиста верхней части «рамы»

11. The result of the installation of the profiled sheet "frame":

- a) Photo of the installation of the profiled sheet of the lower part of the "frame";
- b) Photo of the installation of the profiled sheet of the upper part of the "frame".

Как показано на рисунке 12 периметр зашитого профлистом фундамента КТП засыпается щебнем, при этом щебень должен выступать за обшивку фундамента на 20-30см.



Рис. 12 Фото усовершенствованной «подушки» фундамента КТП киоскового типа

Fig. 12 Photo of the improved "cushion" of the KTP kiosk-type foundation

Реализация вышеуказанной технологии монтажа «подушки» под фундамент КТП 10/0,4 киоскового типа производилась на базе филиала ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго», при этом усовершенствованная технология монтажа «подушки» под фундамент КТП киоскового типа была принята ПАО «МРСК Центра» как рационализаторское предложение и будет использоваться во всех филиалах компании.

Одним из критериев, характеризующих эффективность использования усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП, является время, затраченное на ее возведение. В ходе проведения эксперимента по монтажу усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП было определено время выполнения работ, которые проводились при реализации предложенного технического решения. Суммарное затраченное время на монтаж усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП представлено на рисунке 13.

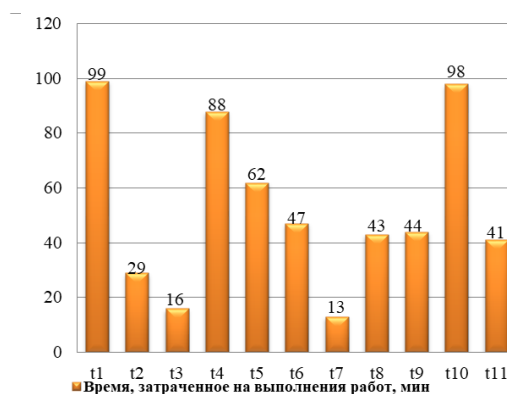


Рис. 13 .Время, затраченное на выполнения монтажа усовершенствованной «подушки» фундамента КТП 10/0,4 кВ киоскового типа

Fig. 13 .Time spent on the installation of the improved "cushion" of the foundation of the KTP 10/0. 4 kV kiosk type

Согласно данным, представленных на рисунке 13, суммарное затраченное время на возведение усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП киоскового типа составило 580 минут, что составляет чуть больше 9,5 часов. При этом в проведении эксперимента по монтажу КТП было задействовано восемь человек. Они осуществляли работы, перечисленные выше. Хочется отметить, что работы по монтажу фундамента КТП киоскового типа проводились при комфортных погодных условиях.

Далее нами было определено соотношение времени выполнения различных видов работ при монтаже усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП, оно представлено на рисунке 14.

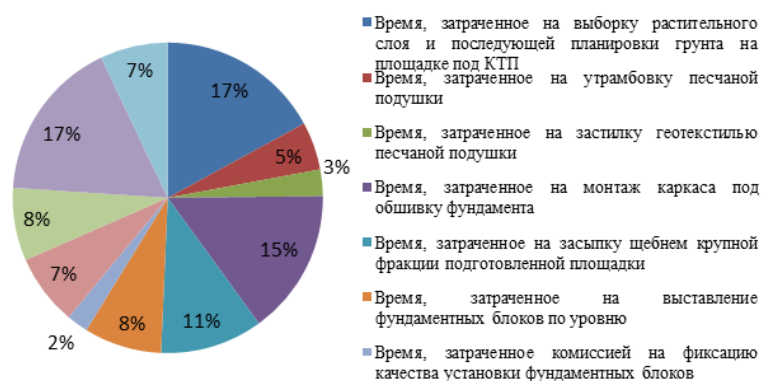


Рис. 14 Соотношение времени выполнения различных видов работ при монтаже усовершенствованной «подушки» под фундамент KTP 10/0,4 киоскового типа

Fig. 14 The ratio of the time of performing various types of work when installing an improved "cushion" under the foundation of the KTP 10/0. 4 kiosk type

По результатам данных, представленных на рисунке 14, видно, что максимальное значение затрачиваемого времени приходится на работы, связанные с выборкой растительного слоя и последующей планировки грунта на площадке под KTP, монтажом каркаса под обшивку фундамента и рамы под профлист. Суммарное значение затраченного времени на вышеуказанные виды работ составляет 285 минут. Также хочется отметить, что минимальное время затрачивается на выполнение сварочных работ.

Поскольку время выполнения работ при монтаже KTP зависит от разных факторов, а для электросетевых компаний и подрядчиков актуальным является вопрос нормирования времени выполнения работ, то предлагается при расчете нормативного времени выполнения работ при монтаже усовершенствованной «подушки» под фундамент KTP киоскового типа использовать время, которое представлено в таблице 2.

Таблица 2

Нормативное время по выполнению монтажа усовершенствованной «подушки» фундамента KTP 10/0,4 кВ киоскового типа

Вид работ	t, мин
Время, затраченное на выборку растительного слоя и последующей планировки грунта на площадке под KTP	110
Время, затраченное на утрамбовку песчаной подушки	30
Время, затраченное на застилку геотекстилем песчаной подушки	20
Время, затраченное на монтаж каркаса под обшивку фундамента	90
Время, затраченное на засыпку щебнем крупной фракции подготовленной площадки	60
Время, затраченное на выставление фундаментных блоков по уровню	45
Время, затраченное комиссией на фиксацию качества установки фундаментных блоков	15
Время, затраченное на установку корпуса KTP киоскового типа на фундаментные блоки	45
Время, затраченное на монтаж защиты фундаментных блоков	45
Время, затраченное на монтаж рамы для профлиста	105
Время, затраченное на монтаж профлиста	45

Суммарно затраченное время на возведение усовершенствованной «подушки» под фундамент KTP киоскового типа, согласно таблице 2, должно составлять 610 минут, что составляет чуть больше 10 часов. При этом параметры времени, представленные в таблице 2, являются рекомендательными, так как время, затраченное на возведение усовершенствованной «подушки» под фундамент KTP киоскового типа является величиной, зависящей от множества факторов и определение этого времени является актуальной задачей для дальнейших исследований. Так же хочется отметить, что в комиссию по оценке качества выполнения работ должно входить не менее 2 человек, при этом члены комиссии должны быть высококвалифицированными специалистами в области строительства и реконструкции KTP киоскового типа.

Выводы

Использование представленных в статье данных о количестве реконструированных, установленных вновь и замененных ТП 10/0,4 кВ позволит ученым и специалистам разрабатывать и предлагать новые способы реконструкции и технологии строительства различных ТП, а так же определять экономическую эффективность новых фундаментов для ТП.

Представленное математическое выражение учитывает все временные затраты на монтаж усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП и является работоспособной при оценке времени монтажа усовершенствованных фундаментов КТП киоскового типа.

Представленная в статье технология монтажа фундамента КТП киоскового типа позволит не только повысить эксплуатационные характеристики КТП, но и обеспечит пожарную безопасность смонтированного оборудования. Кроме того, выполнение полного цикла перечисленных выше работ улучшит внешний вид трансформаторных подстанций и придаст ему эстетичность, что в итоге будет положительно влиять на имидж электросетевых компаний.

Техническое решение, указанное в статье может применяться при реконструкции и строительстве КТП 10/0,4 кВ киоскового типа. Предложенный алгоритм монтажа усовершенствованной «подушки» под фундамент КТП киоскового типа является универсальным, так как он может использоваться на КТП различной мощности.

Литература

1. Малыгин Д.В., Бородин М.В., Беликов Р.П. Универсальная конструкция кожуха трансформатора для КТП 6-10/0,4 кВ // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 2 (60). С. 11-17.
2. Borodin M., Psarev A., Kudinova T., Mukhametzhanov R. Improving power quality by calculating voltage losses. В сборнике: E3S Web of Conferences, 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, С. 01041.
3. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Взаимосвязь характеристик силовых трансформаторов и их нагрузочной способности // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 1 (55). С. 48-55.
4. Пузач С.В., Горюшкин С.С. Оценка теплового воздействия лесного пожара на электрическую подстанцию с масляными трансформаторами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 3. С. 79-83.
5. Грачева Е.И., Нгуен Т. Некоторые особенности ремонта силовых трансформаторов // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2017. № 1 (47). С. 3-9.
6. Назаров А.Н., Беликов Р.П. Разработка технических мероприятий по повышению электробезопасности электрооборудования КТП 10/6/0,4 кВ для сельских электрических сетей // В сборнике: Физика и современные технологии в АПК. Материалы XII Всероссийской (с международным участием) молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников. Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина. 2021. С. 148-150.
7. Сагадеева Н.А., Сагадеева Е.А. Трансформаторные подстанции – основной элемент распределительных сетей // Главный энергетик. 2009. № 12. С. 14-17.
8. Комплектные трансформаторные подстанции - КТП, «Киоскового» Типа. ЗАО "ЗЭТО" // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 3. С. 26-27.
9. Виноградов А.В., Сорокин Н.С. Требования к функциональным возможностям трансформаторных подстанций ТП 6...20/0,4 кВ в структуре интеллектуальных электрических сетей // АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ В АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Благовещенск, 2020. С. 143-148.
10. Chernyshov V.A., Semenov A.E., Belikov R.P., et al. The method of extending drone piloting autonomy when monitoring the technical condition of 6-10 kV overhead power lines // В сборнике: E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. 2019. С. 02010.
11. Vinogradov A.V., Vasiliev A.N., Bolshev V.E., et al. Methods of reducing the power supply outage time of rural consumers // Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions. Сер. «Premier reference source» Hershey, PA, USA, 2019. С. 370-392.
12. Псарев А.И. Анализ потерь электроэнергии в электрических сетях филиала ПАО "МРСК Центра"-«Орелэнерго» Орловский РЭС // Инновационное развитие университетской

библиотеки: менеджмент и маркетинг. Материалы II научно-практической конференции. 2018. С. 65-68.

13. Бородин М.В. Программный продукт по сокращению коммерческих потерь электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 2 (46). С. 76-85.

14. 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.

15. Manusov V., Kokin S., Ahyoev Ja. Multi-criteria analysis of fuzzy symptoms of electrical faults in power systems // International Journal of Energy Production and Management. 2018. Т. 3. № 2. С. 89-96.

Авторы публикации

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

Захаров Сергей Юрьевич – заместитель главного инженера по эксплуатации, филиал ПАО «МРСК Центра и Приволжья»-«Тулэнерго».

Беликов Роман Павлович – канд. тех. наук, доцент кафедры «Электроснабжение», Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина..

Бобровский Владимир Иванович – начальник управления технологического развития и цифровизации, филиал ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго».

References

1. Malygin DV, Borodin MV, Belikov RP. Universal'naya konstrukciya kozhuha transformatora dlya KTP 6-10/0,4 kV. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij CHernozem'ya*. 2020;2 (60):11-17.

2. Borodin M, Psarev A, Kudinova T, et al. Improving power quality by calculating voltage losses. В сборнике: E3S Web of Conferences, 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, С. 01041.

3. Gracheva E.I., Alimova A.N. Vzaimosvyaz' harakteristik silovyh transformatorov i ih nagruzochnoj sposobnosti. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij CHernozem'ya*. 2019;1 (55):48-55.

4. Puzach SV, Goryushkin SS. Ocenka teplovogo vozdeystviya lesnogo pozhara na elektricheskuyu podstanciyu s maslyanymi transformatorami. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya* . 2017;3:79-83.

5. Gracheva EI, Nguen T. Nekotorye osobennosti remonta silovyh transformatorov. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij CHernozem'ya*. 2017;1 (47):3-9.

6. Nazarov AN, Belikov RP. *Razrabotka tekhnicheskikh meropriyatij po povysheniyu elektrobezopasnosti elektrooborudovaniya KTP 10/6/0,4 kV dlya sel'skih elektricheskikh setej*. V sbornike: Fizika i sovremennye tekhnologii v APK. Materialy HII Vserossijskoj (s mezhdunarodnym uchastiem) molodezhnoj konferencii molodyh uchenyh, studentov i shkol'nikov. Orlovskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. N.V. Parahina. 2021;148-150.

7. Sagadeeva NA, Sagadeeva EA. Transformatornye podstancii – osnovnoj element raspredelitel'nyh setej. *Glavnyj energetik*. 2009;12:14-17.

8. Komplektnye transformatornye podstancii -KTP, «Kioskovogo» Tipa. ZAO «ZETO»// *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2017;3:26-27.

9. Vinogradov AV, Sorokin NS. Trebovaniya k funkcional'nyh vozmozhnostyam transformatornyh podstancij TP 6...20/0,4 kV v strukture intellektual'nyh elektricheskikh setej. V sbornike: *AKTUAL'NYE VOPROSY ENERGETIKI V APK*. Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Blagoveshchensk, 2020;143-148.

10. Chernyshov VA, Semenov AE, Belikov RP, et al. *The method of extending drone piloting autonomy when monitoring the technical condition of 6-10 kV overhead power lines*. В сборнике: E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. 2019. С. 02010.

11. Vinogradov AV, Vasiliev AN, Bolshev VE, et al. *Methods of reducing the power*

supply outage time of rural consumers. Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions. Сер. "Premier reference source" Hershey, PA, USA, 2019. С. 370-392.

12. Psarev AI. Analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh setyah filiala PAO «MRSK Centra»-«Orelenergo» Orlovskij RES. V sbornike: Innovacionnoe razvitie universitetskoy biblioteki: menedzhment i marketing. Materialy II nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018;65-68.

13. Borodin MV. Programmnyj produkt po sokrashcheniyu kommercheskih poter' elektroenergii. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2020;12:№ 2 (46):76-85.

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

15. Manusov V, Kokin S, Ahyoev Ja. Multi-criteria analysis of fuzzy symptoms of electrical faults in power systems. International Journal of Energy Production and Management. 2018;3:2:89-96.

Authors of the publication

Maxim V. Borodin – Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhina.

Sergey Y. Zakharov – Branch of IDGC of Center and Volga Region, IRGC - Tulenergo, Tula, Russia.

Roman P. Belikov – Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhina ..

Vladimir I. Bobrovsky – Branch of IDGC of Center, IRGC - Orelenergo, Orel, Russia.

Получено 30.04.2021 г.

Отредактировано 12.05.2021 г.

Принято 21.06.2021 г.



ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВОГО ПРОБОЯ И ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ НА СРАБАТЫВАНИЕ

Ю.Н. Ерашова¹, И.В. Ившин¹, И.И. Ившин¹, А.Н. Тюрин².

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ», г. Казань, Россия

ivshini@mail.ru, turinal@rambler.ru., yuliya.kostina@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* На основе анализа причин дугового пробоя, принципа работы устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков (УЗДП) обосновать требования к ним, разработать устройство для проверки УЗДП и провести испытания на условия срабатывания. *МЕТОДЫ.* Для решения проблем, связанных с особенностями протекания дуговых процессов в различных электрических цепях и отсутствием критериев по многим ключевым параметрам в части требований и применимости УЗДП, проведены ряд испытаний под конкретные параметры сети, проверены корректность работы УЗДП. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработано устройство для проверки УЗДП, проведены испытания на эффективность срабатывания под конкретные условия сети, даны указания по его эксплуатации. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанное Устройство для проверки аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков (УП УЗДП) позволяет контролировать факт обязательного срабатывания УЗДП за определенное время и сформулировать требования необходимые при проектировании электрических сетей. Установлено, что последовательный дуговой пробой способен отключить, лишь устройство защиты от дуговых пробоев (УЗДП) и соответственно повысить безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ с целью уменьшения пожаров, вызванных нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования.

Ключевые слова: дуговой пробой; УЗДП; пожарная безопасность; устройства защиты; искрение.

Для цитирования: Ерашова Ю.Н., Ившин И.В., Ившин И.И., Тюрин А.Н. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 168-180. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180.

DEVICE FOR TESTING ARC BREAKDOWN AND SPARK GAP PROTECTION DEVICES

YuN. Erashova¹, IV. Ivshin¹, II. Ivshin¹, AN. Tyurin²,

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC "TATELEKTROMONTAZH", Kazan, Russia

ivshini@mail.ru, turinal@rambler.ru, yuliya.kostina@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To justify the need to use an arc breakdown protection device (ABPD) in electrical networks up to 0.4 kV, in order to reduce the number of fires. To analyze the existing

types of damage, compare the protection devices against various types of damage in electrical networks up to 0.4 kV. To consider the requirements for ABPD, as well as the main characteristics of protection devices and types of execution. To determine the area of application of the ABPD in electrical installations for various purposes. METHODS. To solve the problems associated with the peculiarities of the arc processes in various electrical circuits and the lack of criteria for many key parameters in terms of the requirements and applicability of the ABPD, it was proposed to conduct a series of tests for specific network parameters in order to understand whether a case can really take place in the current power system when ABPD will not work properly. RESULTS. A test bench has been developed for testing the protection devices against arc breakdown and spark gaps for the effectiveness of operation for specific network conditions, instructions for its operation are given. CONCLUSION. It has been established that a sequential arc breakdown can only switch off an arc breakdown protection device (ABPD) and, accordingly, increase the safety of operation of electrical networks up to 0.4 kV in order to reduce fires caused by violation of the rules for the design and operation of electrical equipment. The proposed device for testing protection devices against arc breakdown and spark gaps allows you to control the fact of mandatory operation of the ultrasonic detector for a certain time and formulate the requirements necessary for the design of power grids.

Key words: arc breakdown; ABPD; fire safety; protection devices; sparking.

For citation: Erashova YuN, Ivshin IV, Ivshin II, Tyurin AN. Device for testing arc breakdown and spark gap protection devices. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):168-180. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180.

Введение

Наиболее часто возникающая причина воспламенения электрооборудования – это дуговые пробой. Зачастую такое явление влечет за собой большой экономический ущерб, человеческий травматизм, а в некоторых случаях и человеческие потери. Подобных пожаров довольно много, судя по статистике МЧС за 2018 год [1].

Дуговые пробой имеют свойство появляться на трудноопределимых участках или зонах, то есть там, где весьма затруднительно определить отказ электросети: повреждение кабеля, находящегося внутри перегородки, спрятанные в стене распределительные коробки с плохими контактами, проблемные соединения в розетках и пр.

Причин, по которым возможно возникновение дугового пробоя, несколько: перелом кабеля при его перегибе на повороте, неплотно прижатые разъемы, повреждение кабеля фиксатором, нарушение изоляционного слоя, оголение и пережатие провода, незакрепленный должным образом контакт, повреждение грызунами, мебелью. Изоляция может повреждаться из-за высокой влажности в помещении или длительного воздействия ультрафиолетового излучения.

Дуговые пробой, которые не удалось обнаружить, приводят к почти мгновенному возгоранию бытовых приборов и электрического оборудования, влекущих за собой образование масштабного пожара.

Дуговой пробой может быть последовательным и параллельным.

Последовательный дуговой пробой (рис. 1) возникает в результате повреждения проводника питающей сети (плохой контакт). Такой вид пробоя трудно обнаружить и поэтому он вызывает большую опасность.

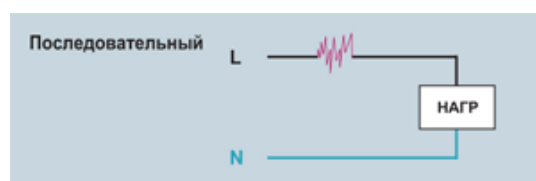


Рис. 1. Последовательный дуговой пробой

Fig. 1. Sequential arc breakdown

Если искрение появляется между двумя контактами электрической цепи, то есть между фазой и нулем или фазой и землей, тогда имеет место параллельный дуговой пробой (рис. 2).

При последовательном пробое можно наблюдать уменьшение тока в цепи и защитный автомат, который срабатывает на повышение тока, не поможет. Параллельный пробой вызывает увеличение тока, но время до возгорания может быть таким коротким, что окажется не достаточным для срабатывания обычного защитного автомата.

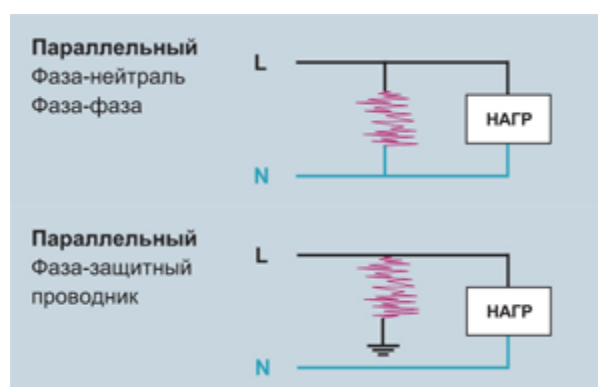


Рис. 2. Параллельный дуговой пробой

Fig. 2. Parallel arc breakdown

Кроме искрения в месте пробоя возникает электромагнитная помеха (рис. 3), которая распространяется по электросетям, кроме того при искрении, напряжение далеко от синусоидальной формы, особенно при реактивной нагрузке (рис. 4). Все это дает сбои в работе различного слаботочного оборудования.

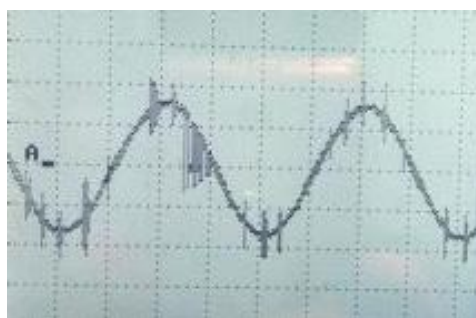


Рис. 3. Искрение в цепи с активной нагрузкой

Fig. 3. Sparking in a circuit with an active load

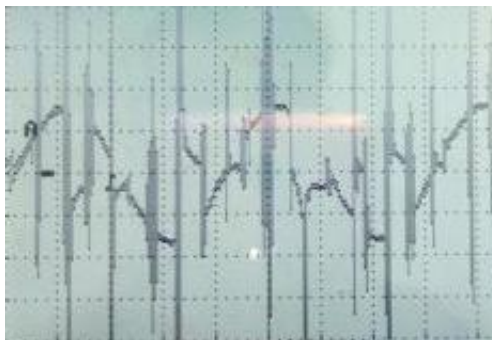


Рис. 4. Искрение в цепи с индуктивной нагрузкой ($\cos\varphi < 0.2$)

Fig. 4. Sparking in a circuit with an inductive load ($\cos\varphi 0.2$)

Сейчас применяется достаточно средств защиты электрооборудования от негативных воздействий и аварийных ситуаций [2].

Автоматический выключатель самое распространенное средство. Размыкает электрическую цепь при повышенном токе и в случае короткого замыкания.

Устройство защитного отключения УЗО служит для защиты от тока утечки на землю и прямого прикосновения к токоведущим частям

Дифференциальный автомат предназначен для защиты и от повышенного тока, и от коротких замыканий, и от утечки на землю.

Реле напряжения служит для защиты электрооборудования от пониженного и повышенного напряжения.

Устройство защиты от импульсного перенапряжения УЗИП защищает от скачков в питающей сети, связанных с включением мощных потребителей и с возникновением грозовых разрядов.

При этом искрение и дуговой пробой ни одним из перечисленных аппаратов защиты не определяются и соответственно развиваются, пока не произойдет критический нагрев, приводящий к повреждениям оборудования и в последующем к пожарам. Например, при последовательном дуговом пробое автоматический выключатель не сработает вследствие большого переходного сопротивления в месте плохого контакта, где и происходит горение дуги. Поэтому значение тока в цепи падает, а для автоматического выключателя данный режим считается номинальным, следовательно, отключения не произойдет. По этой же причине не сработает УЗО, ток утечки при дуговых процессах меньше установленного производителем УЗО.

Основой государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности является развитие пожарной охраны, для эффективного функционирования которой необходимо использовать новейшую технику и инновационные технологий [3].

Для предотвращения пробоев в виде дуги разработано и успешно применяется специальное устройство защиты от дуговых пробоев (УЗДП), которое при обнаружении пробоя отключает поврежденную схему [4]. Вероятность срабатывания для различных устройств защиты приведена в таблице 1. Устройство защиты от дуговых пробоев представляет собой микропроцессорный модульный релейный аппарат, предназначенный для электрической цепи класса до 0,4 кВ. В русскоязычной терминологии устройство может называться УЗИс (устройство защиты от искрения), УЗДР (устройство защиты от дуговых разрядов), РИЗ (реле искровой защиты). В США устройства с аналогичным принципом действия *AFDI* (*ArcFaultDetectionandInterruption*), а в Европе *AFDD* (*ArcFaultDetectionDevices*). С момента выхода в РФ документа *IEC 62606-2016*¹ наиболее верным названием является УЗДП.

¹ ГОСТ IEC 62606-2016. Устройства защиты бытового и аналогичного назначения при дуговом пробое. Общие требования.

Таблица 1

Вероятность срабатывания для различных устройств защиты

Вид пробоя	Вероятность срабатывания, устройства защиты			
	Автоматический выключатель	УЗО	Диф.автомат	УЗДП
Параллельный между фазой и землей	вероятно	срабатывает	вероятно	срабатывает
Параллельный между фазой и нулем	вероятно	не срабатывает	вероятно	срабатывает
Последовательный	не срабатывает	не срабатывает	не срабатывает	срабатывает

Литературный обзор

Первые УЗДП появились на рынке США в 1999 году, в Западной Европе в 2012 году. При проектировании и эксплуатации УЗДП остались не решенными полностью проблемы, вызванные ложными срабатываниями из-за электромагнитных помех не связанных с аварийным искрением.

Устройство защиты от дуговых пробоев относится к микропроцессорной технике. Встроенный микроконтроллер делает спектральный анализ тока и напряжения в нагрузке, и по завершению, в случае обнаружения, ошибки цепь отключается. Устройство чувствительно к помехам от искрения на его выходе [5]. УЗДП состоит (рис.5) из силового разъединителя, который обычно имеет два модуля: в первый помещается блок обнаружения дугового пробоя (БОДП), во второй – механизм автоматического выключателя с тепловым и электромагнитным расцепителями [6]. Силовой разъединитель отключает только фазный провод.

По команде БОДП третий расцепитель, управляемый теристорным ключом, отключает нагрузку. Трансформаторы тока контролируют ток в фазном проводе. Мгновенное значение тока с частотой сети считывает трансформатор низкочастотного канала, затем ток выпрямляется диодным мостом и сигнал усиливается. Трансформатор высокочастотного канала считывает сигнал, лежащий в диапазоне от 5 до 50 МГц. Высокочастотный сигнал выпрямляется детектором среднеквадратического значения. Встроенный микроконтроллер оцифровывает и анализирует оба аналоговых сигнала. Блок питания микроконтроллера устанавливается между фазой и нейтральным проводом [7].

Характерная особенность тока дугового пробоя – широкий спектр распределения частот, простирающийся примерно до 1 ГГц. Этот широкополосный сигнал естественным образом модулируется. Дуга прерывается при переходе напряжения сети через ноль и загорается вновь с ростом мгновенного значения напряжения. УЗДП анализируют амплитуду, и скорость изменения огибающей на выходе высокочастотного канала с учетом фазы низкочастотного сигнала [8].

Если и амплитуда, и скорость изменения огибающей высокочастотного сигнала превосходят заданные производителем значения, то при ближайшем переходе напряжения сети через ноль программа пытается распознать признаки аварийного состояния и по достижению установленного значения микроконтроллер выдаёт тиристорному ключу команду на отключение нагрузки. Если программа не распознает признаки аварийного искрения, то поиск ошибки сбрасывается. После срабатывания защиты повторное автоматическое подключение нагрузки может сделать только человек

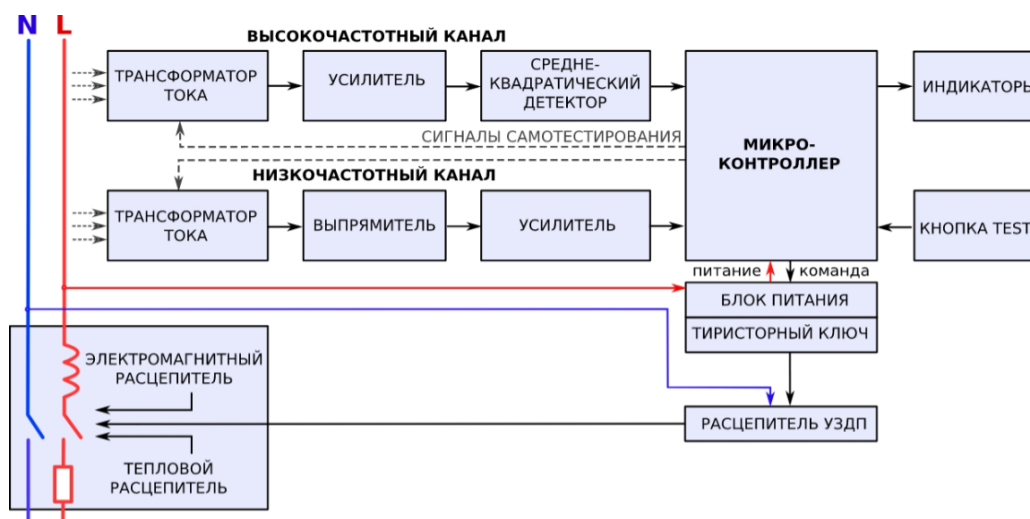


Рис. 5. Блок-схема УЗДП

Fig. 5. Block diagram of the UZDP

Подобрать, и настроить алгоритм нужно так, чтобы УЗДП надёжно распознавал аварийные, пожароопасные искрения и исключал ложные срабатывания от неопасных помех. Для этого необходимо учесть следующие условия: мощность помех должна превосходить фоновый уровень на 15дБ; длительность регистрируемой помехи должна составлять не менее 60 % от предельного времени отключения, установленного ИЕС 62606-2016; в течение как минимум 95 % этой длительности должна наблюдаться модуляция помехи удвоенной сетевой частотой; в течение как минимум 80 % этой длительности мощность помехи должна быть стабильной; ток в контролируемой цепи должен составлять не менее 1,5 А [9].

Схема подключения УЗДП приведена на рисунке 6. Перед УЗДП, для защиты предусмотрен автоматический выключатель (АВ).

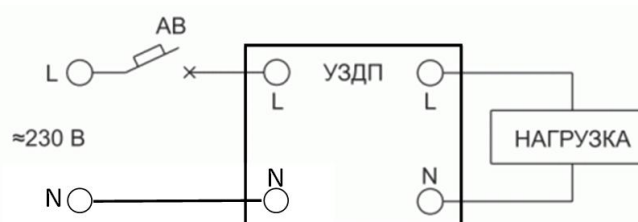


Рис. 6. Схема подключения УЗДП

Fig. 6. USIP connection diagram

Для обеспечения надежного срабатывания УЗДП лучше устанавливать ближе к потребителям. Вместе с этим нужно учесть, что опасное искрение до места установки УЗДП не обнаружит, а также наличие приборов, которые сильно «фонят» при работе могут мешать УЗДП правильно распознавать дуговой пробой [10]. На сегодняшний день не сформулированы четкие требования регламентирующие количество УЗДП в щитах, места установки УЗДП, характер нагрузки защищаемой УЗДП [11].

УЗДП могут быть разработаны изготовителем в качестве единого устройства, имеющего размыкающее устройство для отключения защищаемой цепи, или включающего в свой состав защитное устройство (рис. 7). Встроенное защитное устройство является либо автоматическим выключателем (АВ) или устройством дифференциального тока (УДТ). УЗДП должно быть защищено от коротких замыканий с помощью автоматических выключателей или плавких предохранителей в случае отсутствия встроенного АВ.

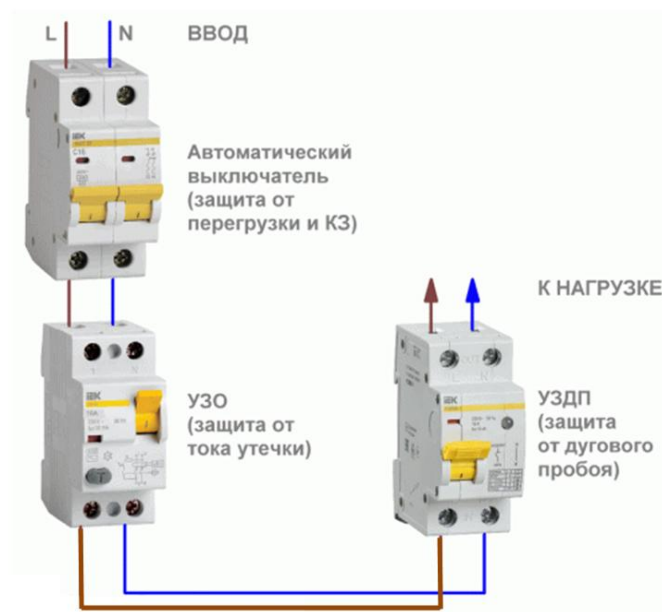


Рис.7. Включение УЗДП в схему совместно с защитным автоматом и УЗО

Fig. 7. Inclusion of UZDP in the scheme together with the protective automatic machine and RCD

Устройство защиты от дуговых пробоев начали применять в конце 90-х прошлого века. Вследствие сложной природы дугового процесса отсутствует идеально подобранный алгоритм работы УЗДП, в котором были бы учтены все случаи в электрических сетях. Сложность конструирования УЗДП в выборе и настройке алгоритма, способного надёжно распознавать аварийные, пожароопасные пробой и одновременно исключать ложные срабатывания от неопасных помех.

Каждая электрическая цепь обладает своими параметрами, такими как: характер нагрузки, коэффициент мощности, параметрами качества энергосетей, а значит, дуговые процессы могут протекать иначе и не соответствовать установленным фирмой-производителем УЗДП шаблонам [12]. Для решения этих проблем необходимо провести ряд испытаний под конкретные параметры сети, чтобы понять действительно ли в текущей энергосистеме может иметь место случай, когда УЗДП не будет срабатывать должным образом [12].

В России введен ГОСТ IEC 62606-2016 «Устройства защиты бытового и аналогичного назначения при дуговом пробое» с 1 июля 2018 г., который идентичен международному стандарту IEC 62606:2013* "Устройства обнаружения короткого замыкания через дугу. Общие требования". Цель настоящего стандарта - установление необходимых требований и процедур испытаний для устройств, устанавливаемых квалифицированным персоналом в местах бытового и аналогичного назначения, предназначенных для снижения опасности электрического возгорания после устройства.

Устройство определения дугового пробоя согласно ГОСТ IEC 62606-2016 рекомендовано применять в следующих местах:

- в помещениях со спальными местами: таких как гостиницы и общежития, детсады, ясли, интернаты, дома престарелых, больницы, школы, жилые дома и квартиры;
- в местах повышенной пожарной опасности в связи с характером обрабатываемых хранящихся материалов: таких как амбары, деревообрабатывающие цехи, склады горючих материалов, бумажные и текстильные производства, сельскохозяйственные помещения;
- в местах, где есть горючие материалы: таких как деревянные дома, здания, где большинство строительных материалов горючие;

- в конструкциях, проводящих пламя: таких как здания повышенной этажности, системы принудительной вентиляции;

- в местах присутствия подверженных опасности или невозстановимых предметов: таких как музеи, национальные памятники, общественные здания и важные объекты инфраструктуры, например аэропорты и железнодорожные вокзалы.

Устанавливать УЗДТ производители рекомендуют на вводе той линии, которую он должен защищать.

Согласно ГОСТ ИЕС 62606-2016, УЗДП должно устранить дуговой пробой в течение времени, указанного в таблице 2.

Таблица 2

Предельные значения времени отключения для УЗДП на $U_n=230$ В						
Испытательный ток дуги, А (действительное значение)	2,5	5,0	10,0	6,0	32,0	63,0
Максимальное время отключения, с	1,00	0,50	0,25	0,15	0,12	0,12

ГОСТ ИЕС 62606-2016 устанавливает необходимый перечень испытаний (или проверок) и число образцов изготовителям для сертификации устройств. После проведения вышеуказанных процедур изготовителем (либо третьей стороной, например, независимой лабораторией) сертифицированные УЗДП монтируются на объектах. Согласно п.1.8.1 «Правил устройства электроустановок (ПУЭ)» [13]: «Электрооборудование до 500 кВ, вновь вводимое в эксплуатацию, должно быть подвергнуто приемно-сдаточным испытаниям...».

Материалы и методы

Для проведения подобных испытаний необходимо оборудование, провоцирующее аварийные ситуации, что в итоге приводит к тепловому дуговому пробую и возгоранию на участках конкретной энергосистемы. С помощью таких устройств можно оценить, когда УЗДП не будет срабатывать должным образом.

Устройство для проверки УЗДП (УП УЗДП) относится к области измерительной и противопожарной техники, в частности к испытательному оборудованию, которое предназначено для проверки устройств защиты от дугового пробоя и искровых промежутков. Известно устройство для проверки защитных аппаратов, основанное на принципе нагружения их током [14]. Недостатком данного оборудования является то, что в нем отсутствует возможность проверки устройств защиты от дугового пробоя и дуговых промежутков.

Предлагаемое устройство должно обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики ($t_{срабатывания} = f(I_{дуги})$) всех типов аппаратов защиты от дугового пробоя и дуговых промежутков отечественных и зарубежных производителей.

Техническим результатом является УП УЗДП, в котором устранены недостатки аналога [15]. Технический результат достигается тем, что УП УЗДП содержит автоматический выключатель, секундомер, генератор дуги, пускатель, концевой выключатель, регулируемую нагрузку и амперметр. Схема предлагаемого устройства приведена на рисунке 8.

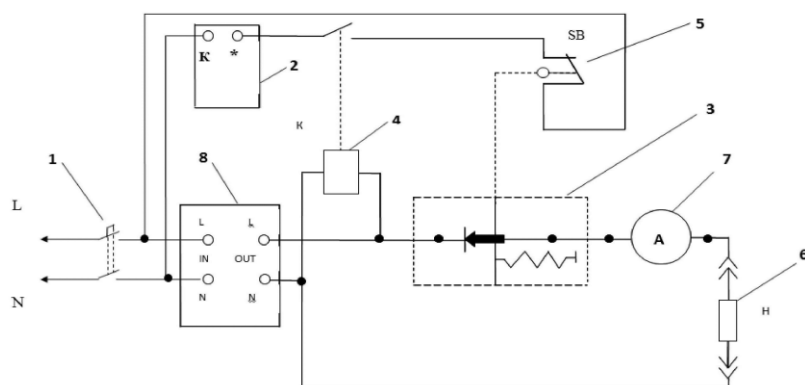


Рис. 8. УП УЗДП, где 1 – автоматический выключатель; 2 – секундомер; 3 – генератор дуги; 4 – пускатель; 5 – конечный выключатель; 6 – регулируемая нагрузка; 7 – амперметр; 8 – аппарат защиты

Fig. 8. UP UZDP, where 1 – automatic switch; 2 – stopwatch; 3 – arc generator; 4 – starter; 5 – limit switch; 6 – adjustable load; 7 – ammeter; 8 – protection device.

УП УЗДП работает следующим образом. При включении автоматического выключателя 1 на ввод 8 устройства защиты подается напряжение сети. При включении устройства защиты 8, срабатывает пускатель 4, подготавливая цепь секундомера 2 (путем замыкания контактов), и через замкнутый генератор дуги 3 и подключенную нагрузку 6 протекает ток, измеряемый амперметром 7. Регулировочным винтом генератора дуги (на чертеже регулировочный винт условно не показан) размыкают электроды, создавая искровой промежуток с последующим возникновением устойчивой электрической дуги. Одновременно с этим замыкают конечный выключатель 5 и запускают секундомер 2. Под воздействием дуги на исправном устройстве защиты происходит его срабатывание с отключением секундомера и прекращением горения дуги. При этом секундомер фиксирует время срабатывания устройства защиты (УЗДП, УЗИС). Таким образом, преимущество предлагаемого УП УЗДП состоит в том, что в устройстве присутствуют: защита от токов короткого замыкания и перегрузки при проверке УЗДП, УЗИС; возможность регулирования значений тока дуги и изменения характера нагрузки для обеспечения безопасной и высокоточной проверки на заявленные характеристики для всех типов УЗДП и УЗИС отечественных и зарубежных производителей. Основным элементом всей испытательной установки является генератор дуги. Испытания можно проводить при наличии дугового разряда в воздушной среде (подобие плохого контакта) или дугового разряда теплового характера (поврежденный кабель). В данном случае происходит моделирование воздушного дугового пробоя при помощи генератора дуги [16]. Генератор спроектирован согласно ГОСТ IEC 62606-2016, что позволяет моделировать процесс, приближенный к реальной электрической дуге или искрению в бытовых условиях. Устройство генератора показано на рисунке 9. Генератор электрической дуги подключен к источнику переменного напряжения и нагрузке.

Генератор электрической дуги работает следующим образом. В исходном положении регулировочный привод находится в положении, при котором угольно-графитовый электрод 7 примыкает непосредственно к насадке неподвижного электрода 4. При разведении электродов с помощью регулировочного привода между подвижным и неподвижным электродом возникает устойчивая электрическая дуга (последовательный дуговой пробой), под воздействием которой происходит проверка устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков. Конструкция дугового генератора обеспечивает плавность сближения электродов, оно реализовано поступательным движением без их прокручивания. Все элементы, кроме электродов изолированы. Угольно-графитовый электрод обладает наилучшими показателями проводимости, не плавится, вместе с этим сохраняет свои свойства и критерии, в отличие от металлических аналогов.

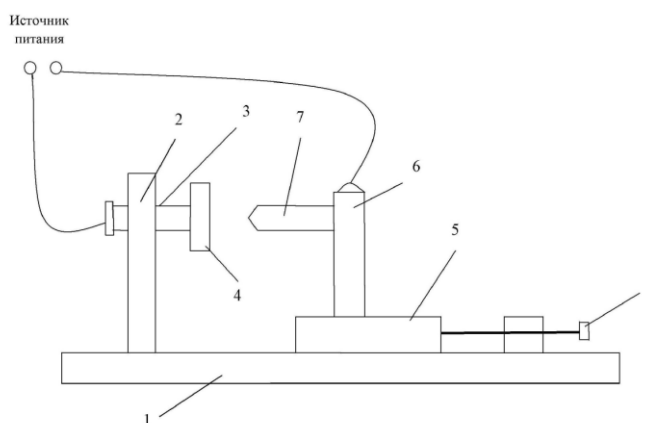


Рис.9. Устройство генератора электрической дуги, где 1– основание, 2– неподвижный элемент, 3– латунный электрод, 4 – насадка электрода, 5 – суппорт, 6 – контактный элемент, 7 – угольно-графитовый электрод, 8 – регулировочный привод

Fig. 9. The device of the electric arc generator, where 1– the base, 2– the fixed element, 3– the brass electrode, 4– the electrode nozzle, 5– the caliper, 6 – the contact element, 7– the carbon-graphite electrode, 8– the adjusting drive

Результаты

Данный подход позволяет определить время срабатывания УЗДП и сравнить его с нормативами, указанными в ИЕС 62606-2016 и понять какие модели, в каких условиях лучше срабатывают. На предлагаемое УП УЗДП получен патент на полезную модель [15].

Предлагаемое Устройство для проверки аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков позволяет контролировать факт обязательного срабатывания УЗДП за определенное время и сформулировать требования необходимые при проектировании, а именно:

- места установки УЗДП в щитах;
- количество УЗДП в щитах;
- характер нагрузки защищаемой УЗДП;
- предельная мощность защищаемой нагрузки УЗДП;
- наибольшая удаленность защищаемой нагрузки от УЗДП.

Обсуждение

Для получения большего количества данных необходимо тестирование нагрузок различного характера при различных токах. К испытательной установке можно добавить электронный осциллограф для исследования колебаний тока при дуговом разряде, что могло бы давать более полное понимание того, почему устройство в каждом конкретном случае срабатывает или нет [17]. По осциллограммам подключенных различных нагрузок, можно видеть изменения присущие дуге, регистрировать время срабатывания УЗДП, сравнивать это с нормативами ИЕС 62606-2016, указанными в таблице 2.

Заключение или Выводы

Проведен анализ причин дугового пробоя, рассмотрены принципы работы устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков (УЗДП), обоснованы требования к ним. Разработано устройство для проверки УЗДП и проведены испытания на условия срабатывания под конкретные параметры сети, проверена корректность работы УЗДП. Полученные результаты позволяют судить об эффективности срабатывания различных моделей УЗДП в различных условиях эксплуатации.

Литература

1. Пожары и пожарная безопасность в 2018 г. Статистический сборник // Москва: ВНИИПО МЧС РФ, 2019.

2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Некоторые особенности исследования основных показателей надежности низковольтных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 1 (29). С. 105–115.
3. Основы государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года. Утверждены Указом Президента Российской Федерации от 01.01.2018 № 2.
4. Королёв И.В., Кондратьев О.Е., Валуев П.В., и др. Анализ целесообразности применения устройств обнаружения дугового пробоя для комплексной защиты от пожаров, вызванных неисправностями электрооборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 128–131.
5. George. D. Gregory., K. Wong., and Dvorak R. F. More About Arc-Fault Circuit Interrupters // IEEE Transactions on Industry Applications. 2004;40:1006-1011.
6. AFDD Technical Guide. Arc fault phenomena and functioning of AFDDs. ABB, 2018.
7. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Козырев А.А. Принцип работы устройства защиты электроустановок от дуговых замыканий // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая политика. 2014. № 1. С. 28-30.
8. Kang C.S. The Operation Characteristics of Circuit Design in Arc Fault Current Interruption // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer (HMT'09). 2009. pp. 85-88.
9. 5SM6 AFDUnit. Technology Primer. Siemens, 2012.
10. Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., и др. Исследование эффективности применения устройства защиты от дугового пробоя // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 102-107.
11. Ившин И.В., Тюрин А.Н., Ерашова Ю.Н. Особенности внедрения устройств защиты от дугового пробоя в электрических сетях до 1 кВ // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. VI Национальной науч.-практ. конф. 10–11 декабря 2020 г., Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. Т. 1. С. 370–374.
12. Королев И.В., Валуев П.В., Бурдюков Д.А. Моделирование срабатывания УЗДП в электрических сетях 0,4 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6(57). С. 124–127.
13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. 2002. №204. С. 44–45.
14. Черников Г.Б. Устройство для проверки защитных аппаратов. Патент на полезную модель № 2148835 от 10.05.2000 г. Заявка № 97120460/09 от 12.08.1997 г.
15. Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Шмуклер М.И., и др. Устройство для проверки аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков. Патент на полезную модель № 200084 от 05.10.2020 г. Заявка № 2020116982 от 22.05.2020 г.
16. Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Шмуклер М.И., и др. Генератор электрической дуги. Патент на полезную модель № 198462 от 02.09.2020 г. Заявка № 20200116974 от 22.05.2020
17. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(1):85-92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>.

Авторы публикации

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук., профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Тюрин Александр Николаевич – канд. техн. наук, главный технолог, АО «ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ».

Ерашова Юлия Николаевна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники», Казанский государственный энергетический университет.

Ившин Игорь Игоревич – студент, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. *Fires and fire safety 2018*. Statistical collection. Moscow: VNIPO EMERCOM of the Russian Federation, 2019.
2. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Some features of the study of the main indicators of the reliability of low-voltage devices. *Vestnik Kazan State Power Engineering University*. 2016;1 (29):105-115.
3. *Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the field of fire safety for the period up to 2030*. Approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated 01.01.2018 No. 2.
4. Korolev IV, Kondrat'ev OE, Valuev PV, et al. Analysis of the feasibility of using arc breakdown detection devices for comprehensive protection against fires caused by electrical equipment malfunctions. *Transmission and distribution*. 2018;2 (47):128-131.
5. George DG, Wong K, and Dvorak RF. *More About Arc-Fault Circuit Interrupters*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2004;40:1006-1011.
6. *AFDD Technical Guide. Arc fault phenomena and functioning of AFDDs*. ABB, 2018.
7. Monakov VK, Kudryavtsev DYU, Kozyrev AA. The principle of operation of the device for the protection of electrical installations from arc faults. *Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical policy*. 2014;1:28 - 30.
8. Kang CS. *The Operation Characteristics of Circuit Design in Arc Fault Current Interruption*. Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Heat and Mass Transfer (HMT'09), pp. 85-88, 2009.
9. 5SM6 AFD Unit. Technology Primer. *Siemens*, 2012.
10. Smelkov GI, Pekhotikov VA, Ryabikov AI, et al. *Investigation of the effectiveness of the use of an arc breakdown protection device*. In the collection: *Actual problems of fire safety and protection from emergencies*. Collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference. 2020. pp. 102-107.
11. Ivshin IV, Tyurin AN, Erashova YuN. Features of the introduction of protection devices against arc breakdown in electrical networks up to 1 kV. *Instrument making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services: mater.* 6 National scientific-practical.conf. December 10-11, 2020, Kazan: Kazan. energ. Univ., 2020;1:370–374.
12. Korolev IV, Valuev PV, Burdyukov DA. Modeling of triggering of ultrasonic detectors in electrical networks about, 4 kV. *Elektroenergiya. Transmission and Distribution*. 2019;6 (57):124-127.
13. *Rules for the device of electrical installations*. 7th edition. 200;204:44–45.
14. Chernikov GB. *Device for testing protective devices*. Utility model patent No. 2148835 dated 05.10.2000. Application No. 97120460/09 dated 08.12.1997.
15. Tyurin AN, Soluyanov YuI, Shmukler MI, et al. *A device for testing protection devices against arc breakdown and spark gaps*. Utility model patent No. 200084 dated 05.10.2020. Application No. 2020116982 dated 22.05.2020.
16. Tyurin AN, Soluyanov YuI, Shmukler MI, et al. *Electric arc generator*. Utility model patent No. 198462 dated 09/02/2020. Application No. 20200116974 dated 05/22/2020

17. Naumov AA. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>.

Authors of the publication

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email:ivshini@mail.ru.

Alexander N. Tyurin – Chief Technologist, TATELEKTROMONTAZH JSC.
Email:turinal@rambler.ru.

Yulia N. Erashova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email:yuliya.kostina@mail.ru.

Igor I. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 21.05.2021 г.

Отредактировано 01.06.2021 г.

Принято 11.06.2021 г.



АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ САМОЗАПУСКА ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Р.У. Галеева¹, С.В. Куксов²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ОДУ АО «СО ЕС» РДУ Татарстан
raisa_gal.52@mail.ru¹, ser.kuksov@mail.ru²

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы моделирования процессов выбега, самозапуска группы асинхронных электродвигателей (АД) при кратковременных нарушениях электроснабжения (КНЭ) и понижениях напряжения при внешних коротких замыканиях (КЗ) удобные для программирования и практического применения. Установить интегральную реакцию группы АД при самозапуске на возмущающее воздействие с учетом их характеристик и длительности для установления допустимых предельных значений КНЭ. Разработать алгоритм переходного процесса самозапуска группы АД при использовании матричного и векторного представления данных при решении основного уравнения движения ротора и его компьютерную реализацию. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись методы: последовательных приближений при решении основного электромеханического уравнения с учетом электромагнитных переходных процессов; метод Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса при решении уравнений параметров режима; метод узловых напряжений. Алгоритм реализован в среде VBA и проверен в среде Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрена модель АД по каталожным данным, алгоритм самозапуска группы АД при КНЭ и внешних КЗ с учетом электромагнитных переходных процессов, обладающий высокой точностью и удобный для практического применения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование каталожных данных АД дает возможность не проводить трудоемкие предварительные расчеты параметров АД. Применение метода Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости, обеспечивает снижение количества итераций. Учет электромагнитных переходных процессов и эффекта вытеснения тока ротора позволяет оценить взаимное влияние двигателей и повысить точность расчетов. Использование метода узловых напряжений позволяет определить остаточное напряжение на секции шин с АД, если в первый момент двигатели включены на КЗ. Реализация алгоритма в среде VBA удобна для практического применения.

Ключевые слова: самозапуск; выбег; переходные процессы; асинхронный двигатель; кратковременные нарушения электроснабжения; скольжение; схема замещения.

Для цитирования: Галеева Р.У., Куксов С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.

ALGORITHM FOR SIMULATING THE SELF-STARTING OF A GROUP OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH A SHORT-CIRCULATED ROTOR

RU. Galeeva¹, SV. Kuksov²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²ODU JSC «SO ES» RDU Tatarstan
raisa_gal.52@mail.ru¹, ser.kuksov@mail.ru²

Abstract: PURPOSE. To consider the problems of modeling the processes of run-out, self-starting of a group of asynchronous electric motors (AM) in case of short-term power outages (NEC) and voltage drops in external short circuits (SC), convenient for programming and practical use. To establish the integral reaction of the AM group during self-start to the disturbing effect, taking into account their characteristics and duration to establish the permissible limit values of the NEC. To

develop an algorithm for the transient process of self-starting of the AM group when using matrix and vector data representation when solving the basic equation of the rotor motion and its computer implementation. **METHODS.** When solving the problem, the following methods were used: successive approximations when solving the basic electromechanical equation, taking into account electromagnetic transient processes; Gauss-Seidel method with accelerating the convergence of the iterative process when solving the equations of the parameters of the regime; method of nodal stresses. The algorithm is implemented in VBA and tested in Matlab Simulink. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers a model of AM according to catalog data, an algorithm for self-starting a group of an AM with NEC and external short circuits, taking into account electromagnetic transient processes, which has high accuracy and is convenient for practical use. **CONCLUSION.** The use of asynchronous motor catalogs makes it possible not to carry out laborious preliminary calculations of the parameters of asynchronous motors. The application of the Gauss-Seidel method with acceleration of convergence provides a decrease in the number of iterations. Taking into account electromagnetic transients and the effect of displacement of the rotor current allows you to evaluate the mutual influence of motors and increase the accuracy of calculations. The use of the method of nodal voltages makes it possible to determine the residual voltage on the busbar section with AM, if at the first moment the motors are switched on to short circuit. The implementation of the algorithm in the VBA environment is convenient for practical use.

For citation: Galeeva RU, Kuksov SV. Algorithm for simulating the self-starting of a group of asynchronous electric motors with a short-circuited rotor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.

Введение и литературный обзор

В последние годы проблема качества электроснабжения становится все более актуальной из-за увеличения числа приемников, чувствительных к кратковременным нарушениям электроснабжения (КНЭ), искажению формы кривой, как питающего напряжения, так и тока. Если в экономике XX века качество электрической энергии измерялось числом ее прерываний (обычно 2-3 раза в год), то в новых условиях это определение не соответствует современному силовому оборудованию и электронике, которые чувствительны к кратковременным нарушениям длительности от 15 до 40 мс [1]. КНЭ происходят десятки раз в год и приводят к значительному экономическому ущербу, даже если их длительность составляет десятки миллисекунд. В такой ситуации решение проблемы надежности электроснабжения и точности определения уставок срабатывания автоматического ввода резерва (АВР) все чаще возлагается на потребителей электроэнергии [2]. Главная задача для высоковольтных АД это обеспечение успешного самозапуска после КНЭ. Современные устройства управления выполняются на микроконтроллерах и поэтому особо чувствительны к провалам напряжения. Реальная длительность провалов напряжения – десятые доли секунды. Сбой в программах управления технологическими процессами неизбежно ведет к аварийным остановам технологических процессов. Работа устройств АВР не может считаться эффективной, если не произойдет самозапуска двигателей потребителей или если за время самозапуска технологические параметры достигнут критических значений и будет остановлено производство. Для решения задачи оценки возможности самозапуска в настоящее время применяют различные модели, основанные на методах с использованием ряда допущений, поскольку точная оценка динамической устойчивости при учете электромагнитных переходных процессов и изменений в системе электроснабжения (СЭС), связанных с сильными возмущениями, весьма сложна [3, 4]. Уровень принимаемых допущений должен соответствовать конечной цели решаемой задачи. С этой точки зрения приближенные методы можно разделить на упрощенный и уточненный, отличающиеся уровнем принимаемых допущений. Уточненные методы расчета самозапуска учитывают ряд факторов, не принимаемых во внимание в упрощенных методах, но оказывающих существенное влияние на переходный процесс. Точность расчетов в значительной степени зависит от математической модели для оценки параметров схемы замещения АД на основе использования каталожных данных [5, 6]. Поэтому математической модели АД является одной из важнейших задач, требующей алгоритмизации. В работе разработан алгоритм и программа переходного процесса самозапуска группы АД с уточненным расчетом параметров схемы замещения АД. Для определения параметров режима в алгоритме используется более удобная система

синхронно вращающихся координат $v(Im)$ и $u(Re)$ взамен d, q (жестко связанной с ротором) для решения уравнений переходного процесса.

Разработанная компьютерная модель для исследования процесса выбега и самозапуска как одиночного так и группы АД удобна для практического применения для обеспечения надежности действия быстродействующих защит и уставок АВР.

Моделирование процесса выбега и самозапуска является актуальной задачей в связи с внедрением средств микропроцессорной техники для управления режимом работы АД, системой электроснабжения в целом и развития информационных технологий. Теоретические модели расчета выбега и самозапуска в основном проводятся по основному уравнению, описывающему характер электромеханических переходных процессов, по механическим характеристикам, тепловым моделям, используя различные методы определения параметров схемы замещения АД [7, 8]. Как правило, подобные расчеты трудоемки, а расчеты, основанные на допущениях, в конечном счете приводят к значительной погрешности. Ряд моделей режима самозапуска с учетом электромагнитных переходных процессов предполагают использование дорогостоящих сложных программных комплексов, требующих специальных знаний электротехнического персонала, что затрудняет их использование для практического применения [9]. Расчет при использовании имитационного моделирования требует предварительного определения параметров схемы замещения группы АД. Аналитические расчеты по каталожным данным с предварительными и последующими проверочными расчетами усложняют программу и увеличивают время расчета особенно, когда имеется группа АД [10]. Моделирование методом синтетических схем не позволяет определить допустимость самозапуска группы АД [8]. Недостатком моделирования самозапуска в среде *Matlab Simulink* в базовой модели является то, что нагрузочный момент на валу АД может быть чисто активным, что требует модернизацию базовых блоков [9]. Использование модели АД с многоконтурной схемой замещения ротора при исследовании группового самозапуска не нашла широкого применения в промышленных программах из-за отсутствия необходимой информации [11]. Модели АД, используемые в программах самозапуска, на основе данных конструкции электродвигателей или полученные путем данных испытаний, измерений достаточно точные, но требующие детального знания геометрии машины, свойств используемых материалов (используется в основном производителями), данных тестирования [12, 13].

К настоящему времени предлагается множество специализированных пакетов для решения прикладных задач, каждая из которых имеет узкую область использования [14]. Единственной доступной информацией о двигателях являются каталожные данные, на базе которых применяются аналитические методы (итерационный, оптимизационные, использующие генетический алгоритм и пр.) достоинством которых являются простота и высокая скорость расчетов при необходимой точности [14, 15].

В некоторых моделях вводятся допущения на количество и мощности АД, что предполагает их использование для ограниченной области применения [5, 13, 16]. Предлагаемые в некоторых исследованиях метод аппроксимации сопротивлений схемы замещения АД, а также упрощенное представление переходного процесса, приводит к существенной погрешности [18, 19, 20]. Единственной доступной информацией о двигателях являются каталожные данные, на базе которых применяются аналитические методы (итерационный, оптимизационные, использующие генетический алгоритм и пр.) Актуальным является создание программы, базирующейся на комплексном подходе при анализе динамики самозапуска группы АД как при КНЭ, так и при внешних КЗ, обладающей достаточно высокой точностью, простотой, малым временем расчета и удобной для практического применения. Разработанный алгоритм позволяет реализовать ситуации, которые приводят к возникновению самозапуска группы электродвигателей. Учет эффекта вытеснения тока в обмотке ротора и электромагнитных переходных процессов позволили оценить взаимное влияние двигателей при выбеге и самозапуске и повысить точность расчетов. Использование итерационного метода с ускорением сходимости по доминирующему параметру, метода последовательных интервалов позволило существенно сократить время расчета.

Материалы и методы

Результатирующее воздействие КЭЭ на работу электрических потребителей и сетей подразделяется на две группы составляющих этого воздействия - электромагнитную и электромеханическую. Одним из критериев надежности работы АД выше 1 кВ является их успешный самозапуск после КНЭ. С другой стороны условием, определяющим эффективность автоматического ввода резерва (АВР) двухтрансформаторной подстанции, является такое включение секционного выключателя, при котором безусловно сохраняются

нормальная работа всех (во всяком случае - всех ответственных) потребителей неповрежденной резервирующей секции шин и самозапуск ответственных потребителей резервированной секции. Требования к моделированию электрохимических переходных процессов определяются поставленной задачей: воспроизведение зависимостей электромагнитного и механического моментов, представление АД динамической моделью. Анализ возможности восстановления системы в первоначальное состояние был проведен по критериям динамической устойчивости с учетом явления поверхностного эффекта, электромагнитных переходных процессов и индивидуального моделирования АД [16,17].

Для рассмотрения динамики самозапуска ЭД составлены системы дифференциальных уравнений описывающих характер протекания электромагнитных и электрохимических переходных процессов с учетом уточняющих факторов. Для решения задачи использовался метод последовательных интервалов, поскольку точная оценка динамической устойчивости при учете всех переходных процессов и изменений в системе электропитания (СЭС), связанных с сильными возмущениями, весьма сложна [17].

Модель для каждого АД с короткозамкнутым ротором представлена соответствующим одним эквивалентным контуром с переменными параметрами: активным сопротивлением статорной обмотки R_1 ; активным и индуктивным сопротивлениями обмотки ротора R_{2C} , $X_{\sigma 2C}$, соответствующие синхронному режиму, соответственно; активным и индуктивным сопротивлениями обмотки ротора, соответствующие пусковому режиму $R_{2П}$, $X_{\sigma 2П}$, соответственно, сопротивлением взаимной индукции между обмотками статора и ротора X_{12} ; индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки статора $X_{\sigma 1}$. Для определения параметров схемы замещения была составлена система уравнений, выражающих параметры режима, соответствующие каталожным данным, через параметры схемы замещения [17]. В качестве каталожных параметров режима нелинейно зависящих от параметров схемы замещения АД были выбраны: пусковой момент $M_{П}$, пусковой ток $I_{П}$, номинальный момент $M_{ном}$, максимальный момент $M_{макс}$, номинальная реактивная мощность $Q_{ном}$:

Пусковой момент при скольжении $s=1$:

$$M_{П} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{П}^2 R_1], \quad (1)$$

где $Z(s) = f(R_1, X_{\sigma 1}, X_{12}, R_{2C}, X_{\sigma 2C}, s)$ – эквивалентное комплексное сопротивление двигателя при скольжении s ; $\eta_{ном}$ – номинальный КПД АД; $\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности; $I_{П}$ – пусковой ток.

Пусковой ток при скольжении $s=1$:

$$I_{П} = [\frac{1}{Z(s)}]. \quad (2)$$

Номинальный момент при скольжении $s = s_{ном}$:

$$M_{ном} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{ном}^2 R_1]. \quad (3)$$

Номинальная реактивная мощность при скольжении $s = s_{ном}$:

$$Q_{ном} = \operatorname{Im}[\frac{1}{Z(s)}]. \quad (4)$$

Максимальный момент при скольжении $s = s_{кр}$:

$$M_{макс} = \frac{1}{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}} [\operatorname{Re}[\frac{1}{Z(s)}] - I_{кр}^2 R_1]. \quad (5)$$

Эффект вытеснения тока в обмотке ротора с достаточной точностью описывается следующими зависимостями [8]:

$$R_2(s) = R_{2C} + (R_{2П} - R_{2C})\sqrt{s},$$

$$x_{2\sigma}(s) = \frac{x_{\sigma 2C} x_{\sigma 2П}}{x_{\sigma 2П} + (x_{\sigma 2C} - x_{\sigma 2П})\sqrt{s}}.$$

Уравнения (1) – (5) представляют пять нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров схемы замещения. Получить явно выраженное решение не удастся, поэтому расчет был произведен методом Гаусса-Зейделя с ускорением сходимости итерационного процесса. Для этого в каждом из уравнений системы:

- 1) определялся доминирующий в этом уравнении параметр схемы замещения;
- 2) преобразовывалось каждое уравнение к виду, удобному для организации расчетов по методу последовательных приближений;
- 3) определялись оптимальные коэффициенты ускорения сходимости и начальное приближение решения.

Расчет параметров схемы замещения АД с короткозамкнутым ротором осуществляется в следующей последовательности: вначале рассчитываются начальные приближения доминирующих параметров, а затем — начальные приближения остальных параметров схемы замещения АД и далее определялись расчетные параметры режима, а на их основе следующие приближения доминирующих параметров.

Расчеты проводились методом последовательных приближений до тех пор, пока не выполнялось условие:

$$|\Delta M_{П}| \cup |\Delta I_{П}| \cup |\Delta M_{НОМ}| \cup |\Delta Q_{НОМ}| \cup |\Delta M_{МАКС}| < \varepsilon,$$

где ε — требуемая точность расчетов последовательных приближений (обычно $\varepsilon = 0,001$); $\Delta M_{П}$, $\Delta M_{НОМ}$, $\Delta M_{МАКС}$ — разность между расчетными и каталожными значениями пускового, номинального, максимального моментов соответственно; $\Delta I_{П}$, $\Delta Q_{НОМ}$ — разность между расчетными и каталожными значениями пускового тока; номинальной реактивной мощности соответственно.

Переходной процесс описывался системой дифференциального электромеханического уравнения движения ротора АД

$$T_j \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{\Sigma} - M_{\text{мех}}$$

и векторно-дифференциального уравнения электромагнитного переходного процесса в его обмотках [16]:

$$T_2' \left(\frac{d\dot{E}''}{dt} + js\dot{E}'' \right) + \dot{E}'' = \frac{x_1 - x''}{x_1} U,$$

где M_{Σ} — электромагнитный момент двигателя; $M_{\text{мех}}$ — момент сопротивления рабочего механизма; T_j — механическая постоянная времени или постоянная инерции вращающихся частей — время, в течение которого ротор машины под действием момента, определенного по номинальной мощности, разгоняется из неподвижного состояния до номинальной частоты вращения; T_2' — постоянная времени обмотки ротора; U — напряжение, подведенное к двигателю; $\frac{x_1 - x''}{x_1}$ — выражение, определяемое параметрами схемы замещения; s — скольжение; $\dot{E}''$ — сверхпереходная ЭДС.

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений определялись свойством непрерывности параметров частоты ω и сверхпереходной ЭДС $\dot{E}''$:

$$\omega(+0) = \omega(-0), \quad \dot{E}''(+0) = \dot{E}''(-0).$$

Зависимость выбора длительности интервала от точности расчета определялась формулой:

$$\Delta t = T_j \cdot \varepsilon,$$

где ε - желательная погрешность вычисления.

В общем виде для большинства вращающихся механизмов зависимость момента от угловой скорости ротора и сопротивления можно выразить формулой:

$$M_{\text{мех}} = M_{\text{мех.нач}} + (M_{\text{мех.ном}} - M_{\text{мех.нач}}) \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^p,$$

где $M_{\text{мех.нач}}$ – начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учета момента трения покоя); $M_{\text{мех.ном}}$ – номинальный момент сопротивления механизма; p – показатель степени; $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения, при которой момент сопротивления равен номинальному.

Общее уравнение электромагнитного момента АД определялось из выражения активной мощности $M_3 = P/\omega_0$ [16]:

$$M_3 \approx \frac{\frac{UE_B''}{X''} \sin \Theta_{E'} + \frac{UE_C''}{X''} \sin(\Theta_{E'} - st)}{\omega_0},$$

где E_B'' , E_C'' – вынужденная, свободная составляющие сверхпереходной ЭДС АД соответственно; $\Theta_{E'}$ – угол между векторами напряжений сети и вынужденной ЭДС АД.

Выражение для вынужденной составляющей сверхпереходной ЭДС можно получить из условия $\frac{dE''}{dt} = 0$:

$$\dot{E}_B'' = \frac{x_1 + x''}{x_1} \frac{U}{1 + jT_2' s}.$$

Для свободной составляющей сверхпереходной ЭДС $\dot{E}_C''(t)$ пропорциональной суммарному магнитному потоку, в начальный момент после изменения режима АД справедливо соотношение:

$$\dot{E}_C''(+0) = \dot{E}''(-0) - \dot{E}_B''(+0).$$

Если в первый момент двигателя включены на короткое замыкание, то вычисление остаточного напряжения $U(+0)$ на шинах, проводилось методом узловых потенциалов:

$$U(+0) = \frac{\sum_{j=1}^n E_j'' Y_j''}{\sum_{j=1}^n Y_j'' + Y_c},$$

где E_j'' – сверхпереходная ЭДС j -го АД, до возникновения возмущения в момент времени $t(-0)$; $Y_j'' = \frac{1}{x_j''}$ – сверхпереходная проводимость j -го двигателя; Y_c – проводимость системы

до точки КЗ; n – количество электродвигателей на шине одного ТП.

В случае, если пропажа питания секции шин происходит из-за отключения линейного выключателя, проводимость системы можно считать равной нулю. Во время этого режима выбега сверхпереходные ЭДС АД затухают значительно медленнее, чем при трехфазном коротком замыкании вблизи секции шин, что в свою очередь может привести к

большому броску тока в первый момент после включения секционного выключателя посредством АВР.

Расчет ведется до тех пор, пока время выбега не совпадет со временем действия АВР:

$$t_B = i\Delta t = t_{ABP},$$

где i – номер интервала расчета.

На рис.1 приведен алгоритм расчета переходного процесса при выбеге, самозапуске одиночного АД с короткозамкнутым ротором (группы АД) с учетом эффекта вытеснения тока ротора, электромагнитных переходных процессов и нелинейностей параметров режима.

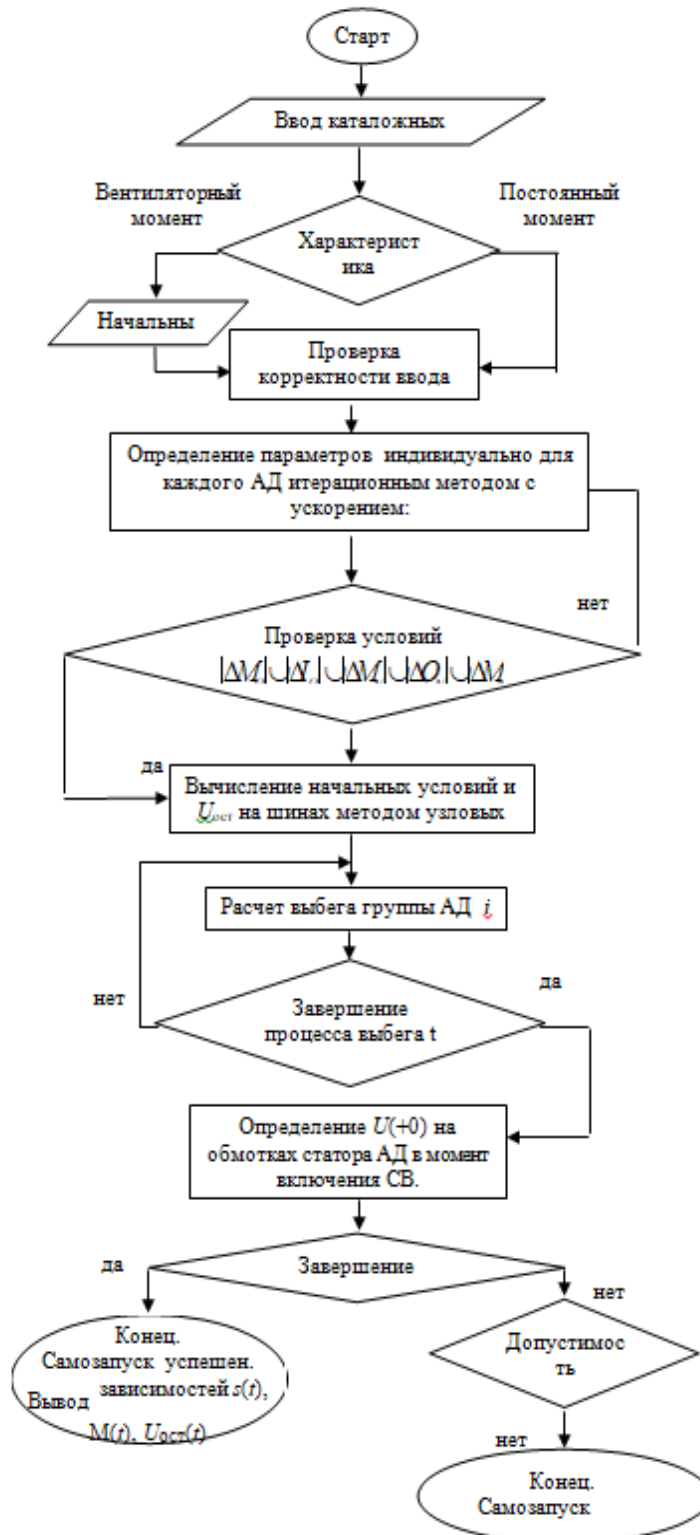


Рис.1. Алгоритм самозапуска АД с

Fig. 1. Algorithm for self-starting the AD with a

Предложенный метод расчета производится для наихудшего случая с наибольшим броском тока и временем самозапуска, что на практике встречается довольно редко. Благодаря этому возможность самозапуска и его продолжительность рассчитывается с запасом для более благоприятного случая. Успешным считается такой самозапуск, когда АД разогнался до рабочей скорости и при этом температура его обмоток не превысит допустимого значения, а так же не произойдет нарушение технологического процесса. Существуют несколько методов расчета нагрева обмоток машин переменного тока. Однако практически все асинхронные двигатели, выпускаемые промышленностью в настоящее время, обеспечивают возможность как минимум однократного самозапуска без превышения температуры обмоток сверх допустимой [7].

По описанному выше алгоритму была реализована программа в среде VBA, позволяющая оценить допустимость самозапуска одного или группы эквивалентных асинхронных электродвигателей после кратковременного нарушения электроснабжения или его недопустимого снижения в результате внешнего КЗ. Данная программа учитывает просадку напряжения в результате самозапуска электродвигателей, а также электромагнитные переходные процессы, возникающие в результате их группового выбега, что позволяет группировать АД по характерным категориям, группам и типам; подключать любое количество электродвигателей, изменять уставки АВР; изменять каталожные данные по мере поступления информации от новых производителей. В качестве электрической схемы распределительного устройства предприятия используется рабочая система шин секционированная выключателем имеющая отдельные независимые источники питания каждой полусекции шин, как наиболее распространенная в системе электроснабжения промышленных предприятий имеющих крупную высоковольтную электродвигательную нагрузку.

Для моделирования переходного процесса используется программный продукт, выполненный в среде *Visual Basic for Applications (VBA)*.

Исходными данными для работы программы являются (рис.2):

1. Каталожные параметры для каждого АД.
2. Типы механизмов приводимых в движение электродвигателями.
3. Параметры системы.
4. Уставки срабатывания АВР.
5. Допустимое время самозапуска (время разворота АД до номинальных оборотов со времени пропажи питания).

The dialog box 'Form1' contains the following input fields and controls:

- System Parameters:**
 - Uост = 0 о.е.
 - tавр = 1 с.
 - tпуск = 5 с.
 - Xс = 0,42 Ом.
- Motor Data (AD1, AD2, AD3):**
 - AD1: P=1000 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=1490 об/мин, Iп=6,2 о.е., Мп=1,2 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
 - AD2: P=200 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=1490 об/мин, Iп=7 о.е., Мп=1,3 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
 - AD3: P=750 кВт, cosφ=0,91, КПД=0,94 о.е., n=2950 об/мин, Iп=6 о.е., Мп=1,1 о.е., Мmax=2,5 о.е., Кол-во двигателей: 1.
- Characteristics of load mechanisms:**
 - Tf = 5 с. (for AD1), Tf = 2,5 с. (for AD2), Tf = 3 с. (for AD3).
 - Вентиляторный момент сопротивления механизма (checkbox).
- Buttons:** 'Рассчитать' (Calculate).

Рис. 2. Диалоговое окно ввода каталожных данных единичного АД или группы АД

Fig. 2. Dialog box for entering catalog data for a single BP or a group of BP

Результаты

В результате расчета строятся зависимости электромагнитного момента $M_d = f(t)$, скольжения ротора АД $s = f(t)$ и остаточного напряжения от времени $U_{ост} = f(t)$ в течении всего процесса (рис.3). В случае неуспешного самозапуска отображается окно вывода, аналогичное представленному на рис.3. Визуально отображается успешность самозапуска, а также рассчитывается время разворота каждого эквивалентного АД. Визуализация зависимостей осуществлена с помощью программы в среде VBA.

Для проверки работоспособности программы, а также для оценки ее погрешности была реализована электромеханическая модель самозапуска АД в среде *Matlab Simulink*. В среде *Matlab* реализован модульный принцип построения модели [21, 22, 23].

В качестве примера приведены результаты расчета времени самозапуска АД типа А-13-59-4 по разработанной программе и в среде *Matlab Simulink*.

Каталожные данные АД:

$U_{ном} = 6$ кВ; $P_{ном} = 1000$ кВт, $\cos\varphi = 0,91$, КПД = 0,94, $n_{ном} = 1490$ об/мин, $I_{п*} = 6,2$, $M_{п*} = 1,2$, $M_{max*} = 2,5$. Время срабатывания АВР составляет 1 с.

Рабочий момент механизма принят равным номинальному моменту двигателя и является постоянной величиной, что характерно для мельниц, транспортеров, компрессоров и других механизмов:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_0} = \frac{P_{ном}}{2\pi \cdot n_0} = \frac{1000000}{2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60} = 6370, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $n_0 = 1500$ об/мин - синхронная частота вращения ротора, принята наиболее близкое значение к $n_0 = 1490$ об/мин из стандартного ряда; постоянная инерции $T_j = 5$ с.

Момент инерции механизма:

$$J = T_j \frac{P_{ном}}{(2\pi \cdot n_0)^2} = 5 \frac{1000000}{(2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60)^2} = 203 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

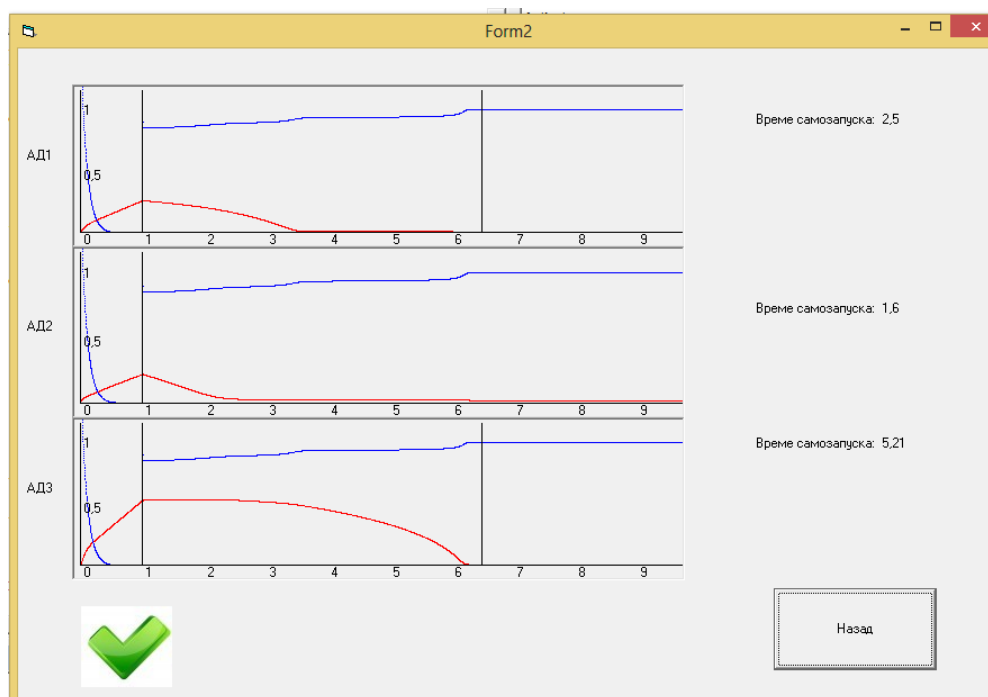


Рис. 3. Окно вывода результатов расчета времени самозапуска и зависимостей $M_d = f(t)$, $s = f(t)$ и $U_{ост} = f(t)$ в относительных единицах

Fig. 3. The window for displaying the results of calculating the self-start time and the dependencies $M = f(t)$, $s = f(t)$ and $U = f(t)$ in relative units

Зависимости электромагнитного момента и скольжения от времени $M_{\text{э}} = f(t)$, $s = f(t)$, соответственно, построенные в расчетной программе и имитационной модели представлены на рис.4,5.

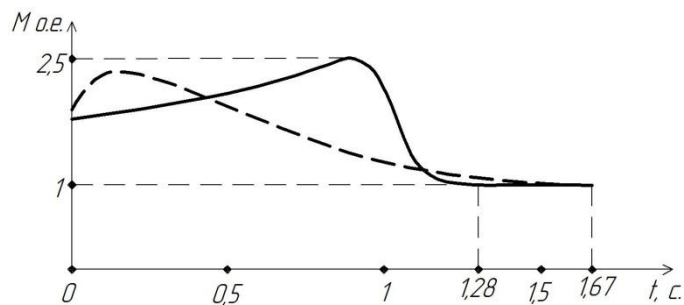


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента от времени $M_{\text{э}} = f(t)$

Fig. 4. Dependence of the electromagnetic moment on time

————— зависимость построенная в программе расчета времени самозапуска;
 - - - - - зависимость построенная при моделировании в среде *Matlab Simulink*.

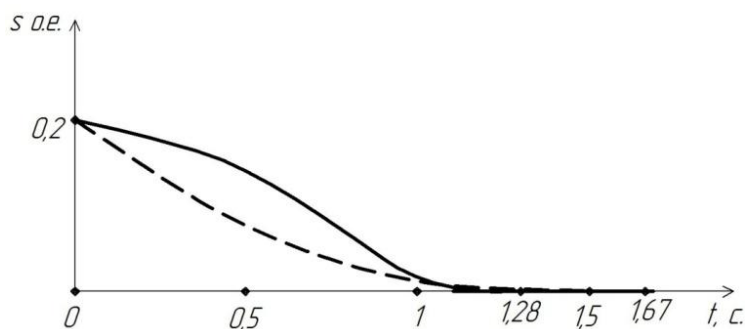


Рис. 5. Зависимость скольжения от времени $s = f(t)$

Fig. 5. Dependence of sliding on time

————— зависимость построенная в программе расчета времени самозапуска;
 - - - - - зависимость построенная при моделировании в среде *Matlab Simulink*.

Как видно из графиков самозапуск прошел успешно, двигатель достиг номинальных оборотов ($s = 0$) за время: $t_{\text{м}} = 1,67$ с (для модели построенной в среде *Matlab Simulink*); $t_{\text{п}} = 1,28$ с (для программы расчета времени самозапуска).

Заключение

Расчеты параметров схемы замещения для представленной модели АД равны каталожным данным кратности пускового и максимального момента АД для обеих зависимостей. Возможность самозапуска АД, смоделированного в среде *Matlab Simulink* и в программе расчета времени самозапуска, совпадает для всех случаев. Различие времени самозапуска для модели в среде *Matlab Simulink* и программы расчета времени самозапуска при скольжениях $s > 0$ объясняется различием характеристик моментов из-за нелинейного изменения параметров цепи ротора при больших скольжениях. Характер изменения сопротивления ротора зависит лишь от конструктивных особенностей и это изменение не может быть вычислено для каждого двигателя в отдельности. Также дополнительная погрешность для модели в среде *Matlab Simulink* вносится упрощенной методикой определения параметров схемы замещения АД. Индивидуальное моделирование каждого АД позволило воспроизвести переходы двигателей из двигательного в генераторный режим и обратно при коротких замыканиях в сети и при КНЭ в процессе группового выбега и переходом к индивидуальному выбегу. В программе итерационный цикл в расчете параметров схемы замещения группы АД не повышает длительность расчета.

Программа расчета переходного процесса при самозапуске группы АД в среде VBA доказала свою работоспособность и возможность ее практического применения. Программа позволяет осуществить проверку обеспеченности самозапуска как одиночного АД, так и

группы двигателей; выбрать рациональное время включения; осуществить проверку правильности выбора АД, провести исследования взаимного влияния двигателей как при КНЭ, так и внешних КЗ, удобна для практического применения.

Литература

1. Пупин В.М., Жуков В.А. Комплекс БАВР. Быстродействие повышает надежность электроснабжения // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 4 (76). С. 2–4.
2. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем // СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». Монография. 2006. Книга 1. С. 369.
3. Семёнов А.С., Егоров Ай.Н., Харитонов Я.С., и др. Оценка электромагнитной совместимости высоковольтных преобразователей частоты в электротехнических комплексах // Вестник КГЭУ. 2019. №4 (44).
4. Pavlov V.E., Peregudova I.G. Study of conditions for group self- starting electric drives of turbo mechanisms // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. Article № 8877660, P. 404-409.
5. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Журн. Вектор науки. ТГУ. 2013. № 1 (23). Раздел Технические науки. С. 108–112.
6. Дорощенко И. В., Погуляев М.Н., Веппер Л.В. Анализ методик расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя по каталожным данным // Учреж. Образ. Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. Республика Беларусь. 2016. С. 136–137.
7. Стыскин А.В., Уразбахтина Н.Г. Моделирование и анализ возможности самозапуска асинхронных двигателей собственных нужд // Уфимский государственный Авиационный технический университет. Журнал Электротехнические комплексы и системы. Уфа. 2017. С. 43–48.
8. Славутский А.Л. Моделирование самозапуска асинхронного двигателя в составе узла комплексной нагрузки // Вест. Чуваш. Ун-та. 2018. № 3. С. 132–137.
9. Жилин Б.В., Исаев А.С. Моделирование самозапуска асинхронного двигателя // Электротехнические комплексы и системы. Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. 2019. № 11. С. 103-108.
10. Осипов В.С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР // Вестник СамГУ. Сер. Технические науки. № 2 (54). 2017. С. 108–120.
11. Меркурьев Г.В., Шарлин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты // Монография. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». 2006. С. 300.
12. Wengerkiewicz Carlos A.C. et al . Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data. J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl., São Caetano do Sul . V. 16. N. 1. 2017. P. 90–107.
13. Sivokobylenko V.F., Tkachenko S.N. A Method of Experimental Determination of Parameters of Equivalent Circuits of Induction Motors. Power Technol Eng. 51.2017. P. 108–113.
14. Asim Gökhan Yetgin et al. Squirrel Cage Induction Motor Design and the Effect of Specific Magnetic and Electrical Loading Coefficient. International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers. IJAMEC. 2019. 7(1). P. 1–8.
15. Guimarães. J.M.C., Bernardes J.V, Hermeto A.E. et al. Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information. IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor. MD. USA. 2014. P. 1–5.
16. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой // МЭИ. Москва. 1997. С. 424.
17. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, Sim Power Systems и Simulink // ДМК Пресс. Москва. 2008. С. 288.
18. Сафарян В.С., Геворгян С.Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энерг. объедин. СНГ. 2015. № 6. С. 20–34.
19. Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 20(9-10). С.92-100.
20. Лащенков М.Б. Влияние самозапуска мощных двигателей на систему электроснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 134–140.

21. Rashad E.E.M. Theory and steady-state analysis of series-connected wound-rotor induction motor in sub-synchronous mode // PECON 2016. IEEE 6th International Conference on Power and Energy, Conference Proceeding, 2016. Article № 7951618. P. 528-533.

22. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7/7 Sp2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики // М. Солон-Пресс. 2016. С. 456.

Авторы публикации

Галеева Раиса Усмановна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Куксов Сергей Вячеславович – ОДУ АО «СО ЕС» РДУ Татарстан, ведущий специалист.

References

1. Pupin VM, Zhukov VA. Complex BAVR. High-speed performance increases the reliability of power supply. *News of ElectroTechnics*. 2012;4 (76):2–4.

2. Dergachev VS. Methods for constructing measuring and starting organs of microprocessor devices for high-speed automatic switching on of a reserve. *Vestnik ISEU*. 2021;1:41–48.

3. Meleshkin GA, Merkuriev GV. *Stability of power systems*. SPb.: NOU «Energy Personnel Training Center». Monograph. 2006;1:369.

4. Kurbangaleev UK. *Self-starting of engines for own needs of power plants*. NTF Energoprogress. Moscow. 2001. P. 64.

5. Makeev MS, Kuvshinov AA. Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of an induction motor according to catalog data. *Journal. Science vector. TSU*. 2013;1 (23):108–112.

6. Doroshchenko IV, Pogulyaev MN, Vepper LV. Analysis of methods for calculating the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous electric motor according to catalog data. *Uchrezh. Form. Gom. State Those. University them. P.O. Sukhoi. Republic of Belarus*. 2016. P. 136–137.

7. Styskin AV, Urazbakhtina NG. Modeling and analysis of the possibility of self-starting of asynchronous motors for auxiliary needs. Ufim. State Aviats. Those. Univ. *Journal Electrotechnical complexes and systems*. Ufa. 2017. P. 43–48.

8. Slavutsky AL. Simulation of self-starting of an asynchronous motor as part of a complex load unit. *Vest. Chuvash. University*. 2018;3:132–137.

9. Zhilin BV, Isaev AS. Simulation of self-starting of an asynchronous motor. Electrotechnical complexes and systems. *Bulletin of TUSU. Technical science*. 2019;11:103–108.

10. Osipov VS. Analytical method for calculating the parameters of the equivalent circuit of three-phase asynchronous motors of the AIR series. *Vest. Samar. State University. Ser. Technical science*. 2017;2 (54):108–120.

11. Merkuriev GV, Charlin YuM. *Stability of power systems. Calculations*. Monograph. SPb.: NOU «Energy Personnel Training Center». 2006. P. 300.

12. Wengerkievicz Carlos A.C. et al. Estimation of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Manufacturer Catalog Data. *Journal Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, São Caetano do Sul. 2017;16(1):90–107.

13. Sivokobylenko VF, Tkachenko SN. A Method of Experimental Determination of Parameters of Equivalent Circuits of Induction Motors. *Power Technol Eng.* 2017;51:108–113.

14. Asım Gökhan Yetgin et al. Squirrel Cage Induction Motor Design and the Effect of Specific Magnetic and Electrical Loading Coefficient. International. *Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*. 2019;7(1):1–8.

15. Guimarães JMC, Bernardes JV, Hermeto AE et al. *Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information*. IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA. 2014. P. 1–5.

16. Gamazin SI, Stavtsev VA, Tsyruk SA. *Transient Processes in Industrial Power Supply Systems Caused by Electric Motor Load*. MPEI. Moscow. 1997. P. 424.

17. Chernykh IV. *Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink*. DMK Press. Moscow. 2008. P. 288.

18. Safaryan VS, Gevorgyan S.G. Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine. *Energetika. Izv. and energy meal*. 2015;6:20–34.

19. Burkov AF, Yurin VN, Avetisyan VR. Investigation of the possibilities of increasing the energy efficiency of induction motors. *Izv. Higher. educational head energy problems*. 2018;20 (9-10):92-100.

20. Laschenov MB. Influence of self-starting of powerful motors on the power supply system. *Mining information and analytical bulletin*. 2019;1:134–140.

21. Chernykh IV. *Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink*. DMK Press. Moscow. 2008. P. 288.

22. Dyakonov VP. Matlab 6.5 SP1/ 7/7 Sp2 + Simulink 5/6. *Artificial intelligence and bioinformatics tools*. M. Solon-Press. 2016. P. 456.

Authors of the publication

Raisa U. Galeeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergey V. Kuksov – ODU of JSC SO ES, RDU Tatarstan, leading Specialist.

Получено 19.04.2021 г.

Отредактировано 06.05.2021 г.

Принято 14.05.2021 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСОВ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Г.А. Палкин¹, А.Ф. Гайсин²

¹Забайкальский государственный университет», г. Чита, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-2524>, pala88@yandex.ru

²gaysinazat@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Работа направлена на решение важной проблемы повышения экономической эффективности, уровня ресурсосбережения и безаварийности участка первого подъема систем централизованного водоснабжения малых и средних населенных пунктов. При этом ставится задача минимизации затрат электроэнергии и водных ресурсов, связанных с переработкой насосов, с одновременным обеспечением защиты трубопровода от замерзания в условиях отрицательных температур окружающей среды. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи был разработан оптимальный метод управления электроприводами насосов первого подъема по запросам конечного потребителя воды, отличающийся от существующих анализом состояния тепловых параметров трубопроводной линии, для её защиты от замерзания в условиях низких температур окружающей среды. Метод основывается на вычислении управляющих воздействий по уровню воды в накапливающем резервуаре или давлению воды в трубопроводе U_L и температуры воды в конце трубопровода U_T , с последующим расчетом оптимальной уставки подачи насоса, которая затем поддерживается методом частотного регулирования. Чтобы определить оптимальные законы вычисления управляющих воздействий и оценить эффективность предложенных решений использовалась имитационная модель Matlab® Smulink. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** По результатам моделирования было выявлено, что для вычисления управляющего воздействия по уровню U_L целесообразно применять ПИД закон, по температуре U_T - ПД закон, по расходу - ПИ закон. Также были оценены параметры технологического процесса и уровень потребляемой мощности в процессе управления. **ВЫВОДЫ.** Исследования предложенной концепции управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность, в частности экономия потребляемой электроэнергии оценивается примерно в 22 % при обеспечении защиты трубопровода от замерзания.

Ключевые слова: электрический привод; электротехнический комплекс; частотное регулирование; имитационное моделирование; защита от замерзания.

Для цитирования: Палкин Г.А., Гайсин А.Ф. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 194-208. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208.

**RESEARCH OF THE OPTIMAL METHOD OF CONTROL OF THE FIRST RISE
PUMPS ELECTRIC DRIVES OPERATED IN CONDITIONS OF NEGATIVE
TEMPERATURES**

GA. Palkin¹, AF. Gaysin²

¹FSBEI HE Transbaikal State University, Chita, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-2524>, pala88@yandex.ru

²gaysinazat@mail.ru

Abstract: **OBJECT.** The work is aimed at solving an important problem of increasing the economic efficiency, the level of resource saving and accident-free operation of the first rise section of the centralized water supply systems of small and medium-sized settlements. At the same time, the task is to minimize the cost of electricity associated with the excess performance of pumps, while ensuring the protection of the pipeline from freezing in conditions of negative ambient temperatures. **METHODS.** To solve this problem, an optimal method for controlling electric drives of first rise pumps at the request of the end user of water was developed, which differs from the existing ones by analyzing the state of the thermal parameters of the pipeline. The method is based on the calculation of control actions based on the water level in the storage reservoir or the water pressure in the pipeline U_L and the water temperature at the end of the pipeline U_T , followed by the calculation of the optimal pump supply setpoint, which is then maintained by the frequency control method. The Matlab® Simulink simulation model was used to determine the optimal laws for calculating control actions and evaluate the effectiveness of the proposed solutions. **RESULTS.** Based on the simulation results, it was found that it is advisable to use the PID law for calculating the control effect for the U_L level, the PD law for the U_T temperature, and the PI law for the flow rate. The parameters of the technological process and the level of power consumption in the control process were also evaluated. **CONCLUSIONS.** Studies of the proposed concept of managing the first rise section have shown high technical and economic efficiency, in particular, the savings in electricity consumption are estimated at about 22 % while ensuring the protection of the pipeline from freezing.

Keywords: electric drive; electrical complex; frequency control; simulation modeling; frost protection.

For citation: Palkin GA, Gaysin AF. Research of the optimal method of control of the first rise pumps electric drives operated in conditions of negative temperatures. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):194-208. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208.

Введение

В современном мире процесс водоснабжения играет важную роль в жизни человеческого общества. Во всем мире наблюдается тенденция к обеспечению качественным централизованным водоснабжением все большего количества населенных пунктов.

Организация водоснабжения требует определенных капитальных и текущих экономических затрат, которые необходимо минимизировать при проектировании и эксплуатации системы водоснабжения.

Основным источником эксплуатационных затрат систем водоснабжения является их электротехнический комплекс, обеспечивающий технологический процесс и вспомогательные нужды объектов водоснабжения. При этом наиболее энергоемким элементом являются электроприводы насосов, которые могут потреблять до 90 % всей электроэнергии, и в то же время являются главным элементом обеспечения технологического процесса.

Особую сложность представляет забор и транспортировка воды в суровых природных условиях эксплуатации, что обуславливает дополнительные энергетические и, как следствие, экономические издержки на данные процессы. Суровые условия эксплуатации свойственны, в первую очередь, районам крайнего севера и территориям с резко континентальным климатом. Тем не менее, освоение данных территории в последнее время является стратегической задачей большинства стран, включающих в свой состав подобные районы. Основными факторами суровых условий эксплуатации являются низкие температуры окружающей среды, вечные мерзлоты и сложный природный ландшафт.

Количество объектов централизованного питьевого водоснабжения на территории Российской Федерации (РФ) на 2020 год составляет 94 299 штук, при этом около 20% источников централизованного водоснабжения сезонно эксплуатируются при низких температурах окружающей среды, при этом 13 % таких систем водоснабжения сосредоточены на территории Сибири и Дальнего Востока [1]. На таких объектах затраты электроэнергии могут повышаться за счет необходимости подогрева помещений и

транспортируемой воды, а также для сброса воды с целью предотвращения замерзания трубопровода. Соответственно, важной задачей является нахождение источников неоправданных энергетических затрат с целью их минимизации.

Участки первого подъема являются ключевыми элементами системы водоснабжения, поскольку их неоптимальная работа может отразиться на функционировании всей системы. Насосное оборудование первого подъема обеспечивает перекачивание воды из скважины или поверхностного водоема в накапливающие резервуары или в систему водоснабжения для прямого разбора.

Чаще всего неоправданные эксплуатационные затраты на участках первого подъема возникают в связи с переработкой насосов. Данная ситуация влечет за собой перерасход электроэнергии на питание электрического привода насосного агрегата, преждевременный износ узлов насоса и трубопроводной системы, растрату природных ресурсов (обычно артезианской воды) за счет перелива воды из резервуара или её слива из системы. Общий объем утечки воды, в том числе на перелив, для Российской Федерации за 2019 год составил 710 913.12 тысяч кубических метров [2]. В некоторых случаях затраты электроэнергии объектов водоснабжения на переработку насосов могут достигать 50 % от общего потребления.

Причиной переработки может являться либо превышение подачи насоса первого подъема над разбором воды, либо поддержание заранее заданных параметров системы водоснабжения, для предотвращения аварийных ситуаций.

Аварийные ситуации на участке первого подъема могут быть вызваны внезапной поломкой узлов насосного агрегата либо трубопроводной системы. Аварии на трубопроводе, эксплуатируемом в суровых природных условиях, являются наиболее опасными и чаще всего возникают в результате замерзания транспортируемой воды. При этом необходимо учитывать, что температура воды в трубопроводе может снижаться не только в связи с низкими температурами окружающей среды, но и за счет изменения гидравлических параметров системы, в первую очередь – подачи насоса.

За 2019 год на территории РФ произошло 14 629 аварий трубопроводов [3], при этом 28 % аварий произошло на территориях с суровыми природными условиями эксплуатации.

Решением описанных проблем существующих систем водоснабжения является использование систем автоматического управления производительностью электроприводов насосов. Обзор существующих решений показал, что наиболее эффективно данная задача решается путем частотного регулирования электропривода насоса [4-10]. При этом изменяется частота питающего напряжения, что пропорционально влияет на гидравлические параметры насоса. В электроприводе насосов номинальной мощностью менее 250 кВт применяются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. При частотном регулировании данных машин изменяется частота вращения вала двигателя и крутящий момент, что влияет на такие гидравлические параметры насоса как напор и подача.

Помимо экономии воды, частотное регулирование позволяет значительно сократить затраты электроэнергии, питающей электродвигатель насоса, в отличие от методов изменения гидравлического сопротивления трубопровода путем применения регулирующих задвижек. Для управления насосами чаще применяется метод скалярного частотного регулирования, поскольку он более простой и дешевый для реализации [11].

Частотное регулирование не лишено и недостатков, к которым можно отнести отрицательное влияние на питающую электрическую сеть [12]. Данный недостаток может быть минимизирован путем применения специальных технических средств, например сетевых фильтров высших гармоник. Также необходимо уделять серьезное внимание параметрам и условиям эксплуатации каждого конкретного объекта водоснабжения. Например, необходимо поддерживать достаточную температуру воды в трубопроводе при изменении производительности насоса в условиях низких температур окружающей среды. Обзор существующих работ по управлению насосами первого подъема [13-15] показал недостаточную степень проработанности данного вопроса.

Таким образом, важной задачей, решаемой в текущей работе, является разработка и исследование методики управления частотно-регулируемыми электроприводами насосов первого подъема, с обеспечением достаточного уровня безаварийности объекта и минимизацией неоправданных эксплуатационных затрат.

Целью исследования предложенного метода является определение наиболее эффективного способа расчета управляющего воздействия на частотный

преобразователь, законов и коэффициентов управления, а также предварительной оценки получаемой выгоды от практического внедрения результатов работы.

Поставленные задачи решаются путем имитационного моделирования методики управления участком первого подъема в компьютерной программе *Simulink* математической среды *Mathworks Matlab*.

В результате проделанной работы был определен наиболее эффективный метод управления участком первого подъема, промежуточные вычислительные законы и коэффициенты, а также оценена экономическая эффективность предложенных решений.

Материалы и методы

При управлении насосом частотным методом предполагается расчет величины подачи, которая затем будет поддерживаться частотным регулятором. Величина подачи должна рассчитываться с учетом потребностей потребителя и обеспечением безаварийности системы. В качестве потребностей целесообразно использовать значение уровня воды в резервуаре или давление воды в трубопроводе, а для обеспечения защиты трубопровода от аварий, связанных с замерзанием воды, анализировать температуру в конце трубопровода. Для реализации данной задачи была разработана схема системы управления, основанная на двухканальном ПИД-регуляторе [16]. Схема приводится на рисунке 1.

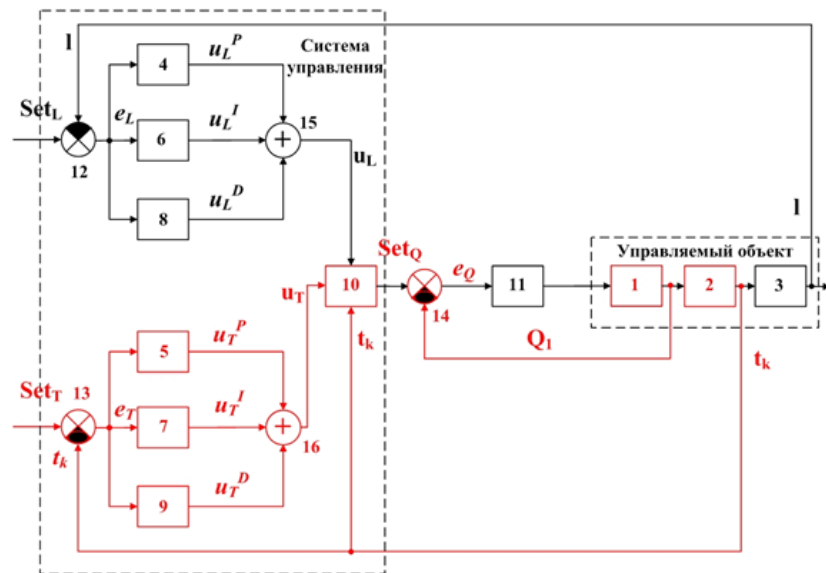


Рис. 1. Схема системы управления

Fig. 1. Control system diagram

В соответствии с рисунком система состоит из: расходомера 1; датчика температуры воды в трубопроводе 2; датчика уровня воды в резервуаре 3; пропорциональных регуляторов по уровню 4 и температуре 5; интегральных регуляторов по уровню 6 и температуре 7; дифференциальных регуляторов по уровню 8 и температуре 9; блока расчета расхода 10; регулятора расхода (частотный преобразователь и насосный агрегат) 11; элементы сравнения (вычитания) 12, 13, 14; сумматоры 15, 16. Элементы 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16 входят в систему управления (СУ), которая может быть реализовано как на базовых цифровых элементах, так и с помощью программируемого контроллера. Элементы 1, 2, 3 входят в состав объекта регулирования.

Кроме того на рисунке 1 используются следующие условные обозначения: l - текущее значение уровня жидкости в резервуаре (давление в трубопроводе); t_k - текущее значение температуры в конечной части трубопровода; Q_1 - текущая величина расхода в трубопроводе; Set_L - задаваемое значение уровня жидкости в резервуаре; Set_T - задаваемое значение температуры в трубопроводе; Set_Q - рассчитываемая величина подачи насоса (расхода в трубопроводе); e_L - величина рассогласования (разности) по уровню; e_T - величина рассогласования (разности) по температуре; e_Q - величина рассогласования (разности) по расходу; u_L^P - пропорциональный управляющий сигнал по уровню; u_L^I - интегральный управляющий сигнал по уровню; u_L^D - дифференциальный управляющий сигнал по уровню; u_L - полный управляющий сигнал по уровню; u_T^P - пропорциональный управляющий сигнал по температуре; u_T^I -

интегральный управляющий сигнал по температуре; u_T^D - дифференциальный управляющий сигнал по температуре; u_T - полный управляющий сигнал по температуре.

Величина уставки подачи Set_Q поступает на элемент сравнения 14 регулятора, затем вычисляется величина рассогласования по подаче e_Q , которая подается на частотный преобразователь для поддержания требуемой величины подачи жидкости в трубопроводе.

Расчет величины подачи, которую необходимо поддерживать может осуществляться разными способами. Для определения наиболее эффективного из них была разработана компьютерная имитационная модель участка первого подъема, включающая его электротехнический комплекс и систему управления [17]. Структурная схема данной модели приводится на рисунке 2.

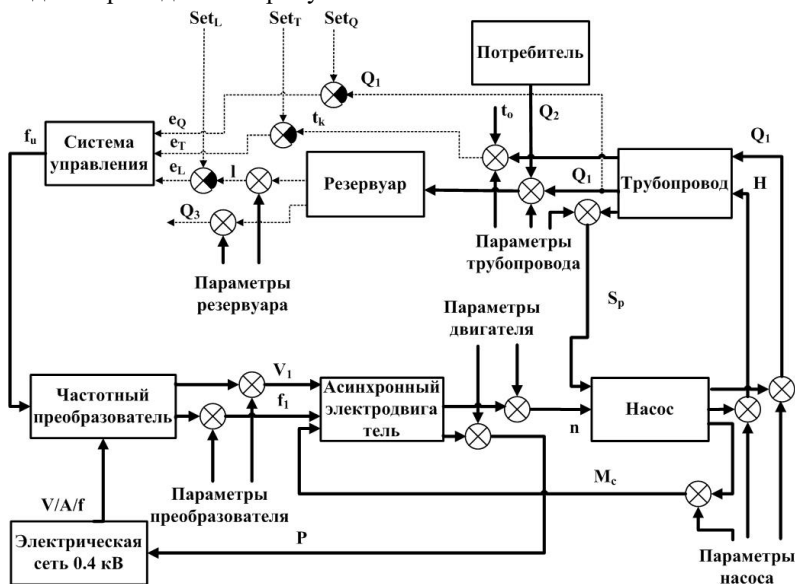


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели

Fig. 2. Block diagram of the simulation model

Помимо описанных ранее, модель учитывает следующие параметры участка первого подъема: напряжение, ток и частота питающей сети - $V/A/f$ (В, А, Гц); управляющее воздействие на частотный преобразователь - f_u (Гц); напряжение на выходе частотного преобразователя - V_1 (В); частота на выходе частотного преобразователя - f_1 (Гц); потребляемая электроприводом насоса мощность - P (Вт); момент сопротивления насоса на валу электродвигателя - M_c (Н·м); механическая частота вращения вала электродвигателя - n (об/мин); объемный расход (подача) в трубопроводе - Q_1 (м³/с); объемный расход на выходе из резервуара (нужды потребителей) - Q_2 (м³/с); перелив воды из резервуара (слив из системы) - Q_3 (м³/с); напор насоса - H (м); напор трубопроводной системы - S_p (м); температура окружающей среды - t_o (°C).

В соответствии со схемой автоматизируемого объекта, сигнал f_u является основным управляющим воздействием на объект; сигналы Q_1 , I , t_k - формируют отрицательную обратную связь путем вычисления соответствующих ошибок регулирования e_Q , e_L , e_T от заданных уставок расхода Set_Q , уровня Set_L и температуры Set_T . Q_2 и t_o - основные возмущающие воздействия. На выходные сигналы каждого элемента воздействуют его внешние и внутренние параметры, условно принятые неизменными в процессе управления.

Описанная схема реализуется в среде *Simulink* в виде имитационной модели, представленной на рисунке 3.

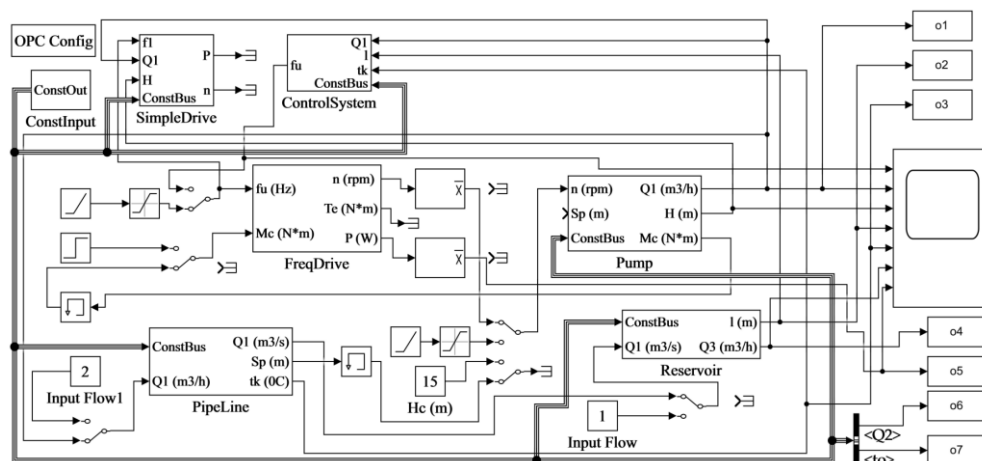


Рис. 3. Имитационная модель Simulink

Fig. 3. Simulink simulation model

Данная модель состоит из шести основных и одного вспомогательного блоков-подсистем. Блоки «*Pump*», «*PipeLine*», «*Reservoir*» и «*ControlSystem*» соответствуют одноименным блокам на рисунке 2. Блок «*FreqDrive*» объединяет в себе трехфазный источник питания, частотный преобразователь и трехфазный асинхронный электродвигатель. Блок «*ConstInput*» предназначен для ввода внешних данных и параметров в модель. Вспомогательная подсистема «*SimpleDrive*» позволяет упрощенно моделировать выходные сигналы асинхронного электропривода, при необходимости проведения длительных расчетов, не требующих высокой точности вычислений.

На рисунке 4 приводится схема подсистемы «FreqDrive».

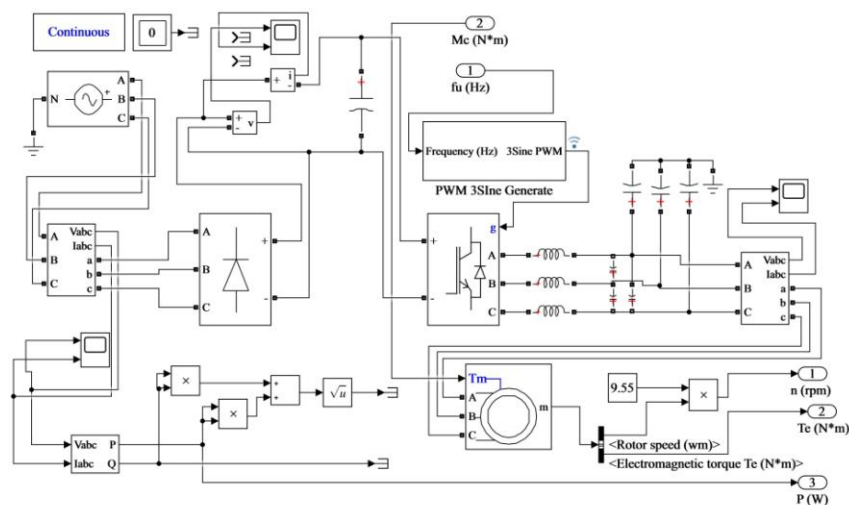


Рис. 4. Подсистема «*FreqDrive*»

Fig. 4. The "FreqDrive" subsystem»

Элемент «*Three-Phase Programmable Voltage Source*» генерирует трехфазное переменное линейное напряжение 380 В с частотой 50 Гц. Данное напряжение выпрямляется полномостовым трехфазным диодным выпрямителем «*Universal Bridge*» и поступает на трехфазный полномостовой инвертор «*Universal Bridge1*» на основе *IGBT*. Режим работы инвертора задается при помощи блока «*PWM 3Sine Generate*». Данный блок генерирует 6 сигналов широтно-импульсной модуляции для открытия транзисторных ключей инвертора на основе трех эталонных синусоид, соответствующих фазным напряжениям. Частота эталонной синусоиды (f_u) поступает в блок в качестве внешнего сигнала, а амплитуда рассчитывается по принципу $V_1/f_1 = \text{const}$, что соответствует скалярному способу частотного преобразования, который наиболее подходит для применения в приводе с насосной нагрузкой. Преобразованное напряжение требуемой частоты поступает на элемент «*Asynchronous Machine SI Units*». Помимо требуемой частоты на выходе частотного преобразователя, блок получает момент сопротивления на валу двигателя M_c . Основными выходными сигналами блока

является механическая частота вращения ротора n , крутящий момент и потребляемая электрическая мощность P .

Подсистема «ControlSystem», приведенная на рисунке 5, реализует в себе различные варианты автоматического управления системой.

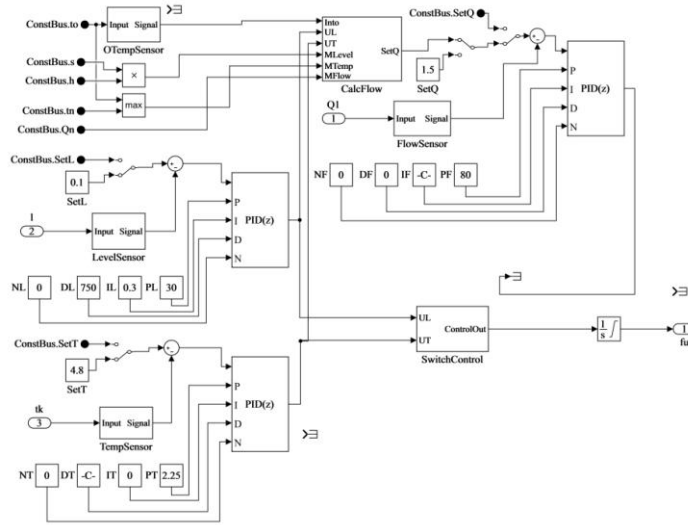


Рис. 5. Подсистема « ControlSystem»

Fig. 5. The "ControlSystem" subsystem

В подсистеме выполняется одновременное вычисление управляющих воздействий по уровню и по температуре, с нахождением оптимального значения общего управляющего воздействия. В качестве основных элементов подсистемы выступают стандартные ПИД регуляторы. Результирующее управляющее воздействие может вычисляться напрямую, как максимум между воздействиями по уровню и температуре, либо через оптимальное значение уставки подачи, задающей затем f_u , которая вычисляется по следующей формуле [16]:

$$\begin{cases} Set_Q(i) = Set_Q(i-1) + \max\left(\frac{Q_n \cdot u_L(i)}{h}, \frac{Q_n \cdot u_T(i)}{\max(t_o(i), t_n(i))}\right), t_k(i) \geq z_k, \\ Set_Q(i) = Q_n, t_k(i) < z_k \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_n – максимально возможная величина подачи насоса ($\text{м}^3/\text{ч}$); h – высота резервуара(м); t_n – температура воды в начале трубопровода ($^{\circ}\text{C}$); z_k – критическая температура ($^{\circ}\text{C}$), вычисляемая по формуле:

$$z_k = Set_T - d, \quad (2)$$

где d - величина допустимого отклонения требуемой температуры Set_T .

Первое выражение формулы 1 предназначено для вычисления оптимальной величины подачи насоса, снижающей финансовые затраты на эксплуатацию электроприводов скважинных насосов, при ограничениях, связанных с замерзанием трубопровода за счет снижения подачи воды. Использование приведенной зависимости для расчета подачи позволяет осуществить минимизацию затрат на переработку насоса при обеспечении безаварийной работы участка первого подъема. Данный результат достигается за счет выбора в качестве основного управляющего сигнала максимального из вычисляемых: по уровню воды в резервуаре, либо по температуре воды в трубопроводе. В первом случае, когда $u_L > u_T$, осуществляется поддержание требуемого уровня воды, при игнорировании температуры, поскольку условия эксплуатации объекта допускают текущие параметры работы участка первого подъема без угрозы замерзания воды. В противном случае осуществляется поддержание заданной температуры воды в конце трубопровода, при игнорировании уровня воды в резервуаре. В данной ситуации обеспечивается защита трубопровода от замерзания в условиях низких температур окружающей среды, при этом возможна незначительная переработка насосов, обеспечивающая требуемую циркуляцию воды. Второе выражение формулы 1 обеспечивает экстренную защиту трубопровода от замерзания путем установки

максимально возможной подачи при резком падении температуры воды.

Моделирование представленной подсистемы позволит подобрать наиболее эффективные коэффициенты регуляторов, а также метод определения общего управляющего воздействия.

Результаты

В качестве входных данных для расчета были выбраны значения основных параметров, которые соответствовали характеристикам разработанного ранее лабораторного стенда [18], на котором выполнялась апробация модели [17].

Для того, чтобы максимально повысить эффективность процесса управления необходимо правильно подобрать вид управляющего закона, а так же его коэффициенты. Как было упомянуто ранее, в качестве основного управляющего закона применяется классический ПИД регулятор. Полный ПИД регулятор позволяет изменить управляющее воздействие максимально быстро и минимизировать статическую ошибку регулирования. Тем не менее, для некоторых процессов применение данного регулятора может дать отрицательный эффект, вплоть до выхода системы из состояния равновесия. Поэтому для каждого управляемого процесса в модели были выполнены исследования как ПИД, так и пропорционального (П), пропорционально интегрального (ПИ), пропорционально дифференциального (ПД) регуляторов. Коэффициенты пропорциональной (K_P), интегральной (K_I) и дифференциальной (K_D) составляющих регуляторов были подобраны по принципу Циглера-Николса.

На рисунке 6 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания уровня воды в накапливающем резервуаре. Величина уставки $Set_L = 0.1$ м. Основное возмущение $Q_2 = 0.7$ м³/ч.

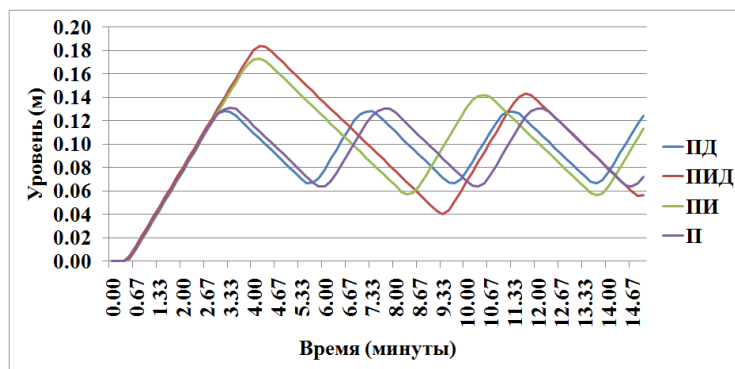


Рис. 6. Результаты управления по уровню воды в резервуаре

Fig. 6. Results of water level control in the tank

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПИД закон, обеспечивающий наибольший период колебаний управляемой величины, что приводит к повышению экономической эффективности управления. Более высокое первоначальное перерегулирование в процессе поддержания уровня не является критическим.

Максимальное перерегулирование составляет: 9 %.

Период колебаний: 2 минуты 18 секунд.

Следует отметить, что анализ управляющего воздействия по уровню показал скачок частоты на этапе разгона двигателя, значительно превышающий максимально допустимое значение. Поэтому было принято решение искусственно ограничивать управляющее воздействие максимально возможным значением, которое может выдать частотный преобразователь для двигателей данного типа. Эта величина составила 50 Гц. Применения ограничения управляющего воздействия позволило значительно уменьшить первоначальное перерегулирование и повысить качество процесса управления. Тот же принцип был применен и в остальных регуляторах системы.

На рисунке 7 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания температуры воды в конце трубопровода. Величина уставки $Set_T = 4.8$ °С. Основное возмущение $t_o = -9$ °С; $t_n = +5$ °С.

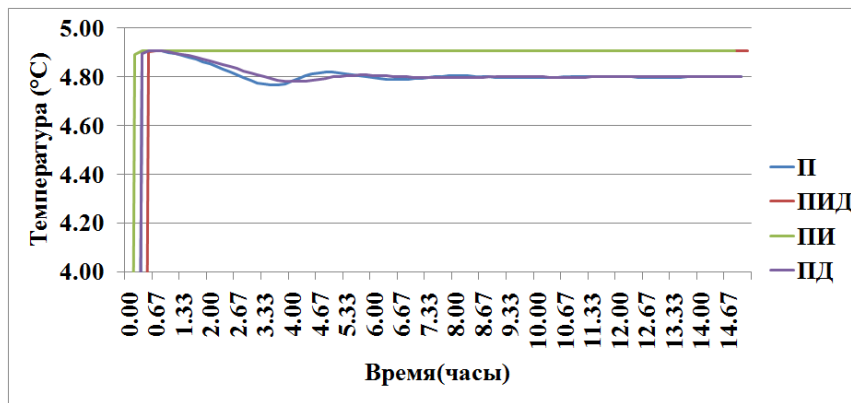


Рис. 7. Результаты управления по температуре воды в трубопроводе

Fig. 7. Results of water temperature control in the pipeline

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПД закон, обеспечивающий быстрое затухание флуктуаций управляемой величины. Первоначальное перерегулирование не превышает величины у остальных законов. На некоторых участках незначительно проигрывает ПД - закону по величине отклонения.

Максимальное перерегулирование составляет: 2 %.

Период затухания основных колебаний: 9 минут.

На рисунке 8 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания подачи (расхода) воды в трубопроводе. Величина уставки $Set_Q = 1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

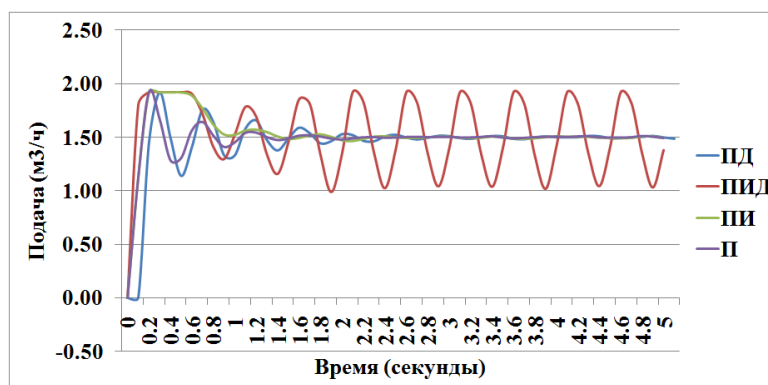


Рис. 8. Результаты управления по расходу воды в трубопроводе

Fig. 8. Results of water flow control in the pipeline

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПИ закон, обеспечивающий быстрое затухание флуктуаций управляемой величины (при условии ограничения управляющего воздействия) и имеющий приемлемое первоначальное перерегулирование. Из фигуры видно, что полный ПИД закон приводит к “расшатыванию” системы и недопустим в текущих условиях.

Максимальное перерегулирование составляет: 20 %.

Период затухания основных колебаний: 2.6 секунды.

Концепция предлагаемого алгоритма управления участком первого подъема заключается в одновременном вычислении и анализе отклонений по уровню и по температуре. Основное управляющее воздействие f_u в данном случае может определяться либо вычислением требуемой уставки по расходу, которая затем поддерживается регулятором расхода, либо прямым преобразованием воздействий по уровню и температуре к общему воздействию.

На рисунке 9 приводится анализ работы прямого двухканального регулятора уровень-температура. Величина уставок $Set_T = 4.8 \text{ °C}$; $Set_L = 0.1 \text{ м}$.

Далее рассмотрен алгоритм в котором по воздействиям от уровня и температуры рассчитывается переменная уставка по расходу Set_Q , которая затем поддерживается регулятором по расходу.

На рисунке 10 приводится анализ работы двухканального регулятора уровень-

температура с промежуточным вычислением уставки расхода. Величина уставок $Set_T = 0$ °C; $Set_L = 0.1$ м.

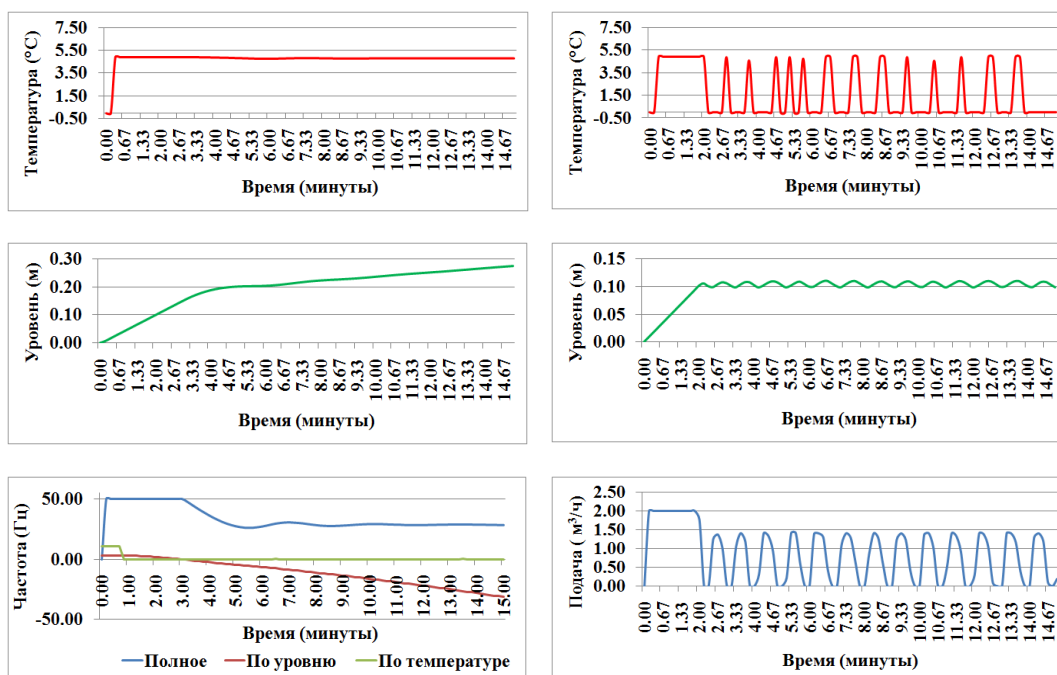


Рис. 9. Прямое управление по уровню и температуре

Fig. 9. Direct level and temperature control

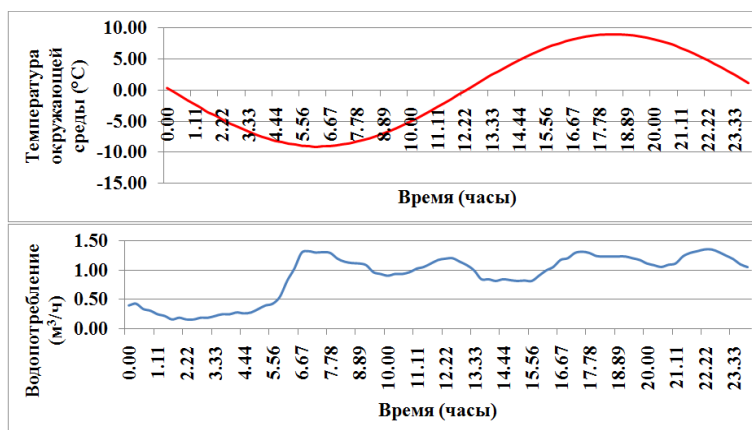
Рис. 10. Управление по уровню и температуре через уставку расхода

Fig. 10. Level and temperature control via the flow setpoint

В первом случае для поддержания заданной температуры требуется большая подача, соответственно уставка по уровню игнорируется, что может привести к переполнению резервуара.

Во втором случае уже игнорируется температура для поддержания требуемого уровня. Флуктуации расхода приводят к постоянным нежелательным скачкам температуры. Следует отметить, что данное явление наблюдается и в предыдущем методе на тех же значениях уставок. Отсюда следует вывод о необходимости более детальной проработки вопроса приведения управляющих воздействий различных физических процессов к величине уставки по расходу.

На рисунке 11 приводится анализ работы двухканального регулятора уровень-температура с промежуточным вычислением уставки расхода для длительного интервала времени (24 часа). Величина уставок $Set_T = 4.8$ °C; $Set_L = 0.1$ м.



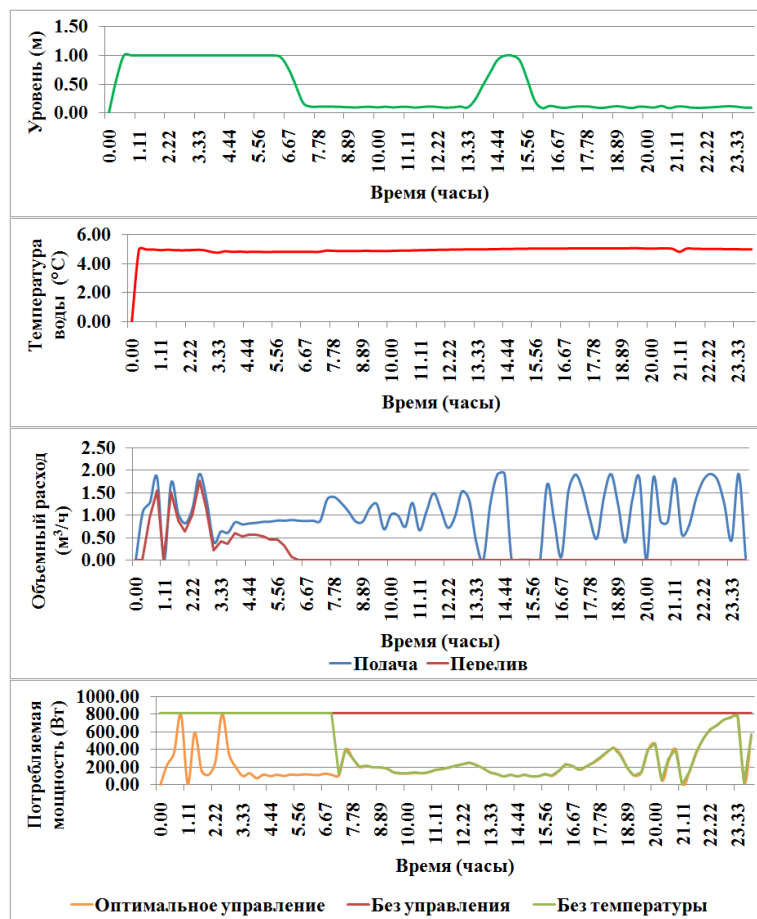


Рис. 11. Анализ поведения системы в течение суток

Fig. 11. Analysis of the system behavior during the day

Для данного эксперимента основные возмущения задавались как величины, изменяющиеся во времени в соответствии с прогнозируемыми суточными колебаниями.

Температура окружающей среды t_0 задавалась по синусоидальному закону со средним значением в 0°C , отклонением в -9°C и периодом 1 Гц. Поскольку точка отсчета соответствует ночному времени суток 0 часов, график синусоиды смещен на половину периода.

Величина водопотребления Q_2 определяется усредненными данными суточного потребления воды.

Из зависимостей видно, что в ночные и утренние часы происходили колебания температуры воды в конце трубопровода, в связи с наиболее низкими температурами окружающей среды. В этот промежуток управляющие воздействия по уровню практически не учитывались, и как следствие происходило переполнение резервуара. На остальных участках уровень поддерживался на заданной величине, за исключением отрезка с резким послеобеденным падением водоразбора.

Анализируя графики потребляемой электрической мощности, можно наблюдать значительное снижение среднего значения данного показателя. Примерная оценка снижения потребляемой мощности по сравнению с номинальным режимом работы системы составила около 70 %. При реализации стандартного управления только по уровню без учета температуры воды, в условиях отрицательных температур окружающей среды, для защиты водовода от замерзания поддерживается максимальная подача насоса, и экономия электроэнергии составляет 48 %. Таким образом, применение предложенного алгоритма управления, по сравнению со стандартными, обеспечивает снижение потребляемой мощности на 22 %. В реальных условиях данная величина может изменяться в зависимости от условий и режимов эксплуатации объекта водоснабжения.

Обсуждение

Исследования системы автоматического управления производительностью насосов показали возможность и целесообразность её применения для повышения

экономической эффективности рассматриваемого объекта. При этом для вычисления управляющего воздействия по уровню целесообразно применять ПИД закон, по температуре - ПД закон, по расходу - ПИ закон. Также было выявлено, что при значительном изменении параметров и возмущений системы, требуется корректировка коэффициентов управляющих закон, что приводит к необходимости применения адаптивных алгоритмов их расчета. В целом, исследования предложенной концепции управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность, в частности экономия потребляемой электроэнергии оценивается примерно в 22 % (данное значение может изменяться в зависимости от параметров и режимов работы моделируемого объекта).

Условия функционирования участка первого подъема подразумевают наличие инерционности основных контролируемых параметров. Причем величина инерции и задержки наложения управляющего воздействия для различных параметров может значительно отличаться. Например, задержка изменения температуры при регулировании расхода, для приведенного расчетного эксперимента, составила порядка 15-30 секунды, не учитывая инерционность датчиков температуры. Задержка же при изменении уровня в накапливающем резервуаре составила порядка 2 минут. Для оптимизации процесса управления необходимо разработать методику точного приведения управляющих воздействий по различным параметрам к единому масштабу, а затем минимизировать негативное влияние инерционности. Также следует отметить серьезное влияние изменения внешних и внутренних параметров и возмущений на качество процесса управления, что требует постоянной корректировки коэффициентов управляющих элементов.

Перспективным направлением дальнейших работ является разработка и исследование адаптивных и прогностических многоканальных регуляторов, обеспечивающих повышение качества процесса управления. Так же необходимо рассмотреть целесообразность использования программного вычислителя величины уставок, компенсирующего изменения внешних условий функционирования участка первого подъема, с возможностью использования вероятностных моделей на основе известной статистической информации о режимах работы объекта. Например, при снижении водоразбора в ночное время целесообразно предварительно снизить поддерживаемый уровень в резервуаре для создания запаса поддержания подачи с обеспечением приемлемой температуры воды. Ближе к утру, наоборот, необходимо повысить поддерживаемый уровень для компенсации повышения водоразбора. Уставка по температуре также может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды.

Эксперименты на модели показали, что в условиях низкого водоразбора поддерживать температуру воды в конце трубопровода путем обеспечения повышенной подачи, является не рентабельным из-за значительной величины переработки насосов. В этом случае допустимой эксплуатационной мерой является предварительный подогрев воды электрическими нагревательными элементами. При этом в комплекс управления требуется ввести дополнительный регулятор, и построить алгоритм управления по принципу нахождения точки минимального энергопотребления между насосом и нагревателем.

Предложенные решения, успешно апробированные на модели, можно будет рекомендовать к внедрению на объектах водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

Заключение

Результаты проведенных расчетов позволили определить методику и оптимальные параметры алгоритма управления: выявлено, что для расчета управляющего воздействия по уровню целесообразно использовать закон ПИД; для температуры - закон ПД; для расхода - закон ПИ. Для расчета основного управляющего воздействия предлагается одновременно рассчитать действия по уровню и температуре с последующим доведением большего из них до заданного значения для расхода, поддерживаемого регулятором расхода. Исследования предлагаемого способа управления показали его высокую технико-экономическую эффективность: экономия потребления электроэнергии оценивается примерно в 22 % при обеспечении защиты трубопроводов от замерзания.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для разработки и оптимизации систем автоматического управления скважинными насосами

первых подъемных участков систем водоснабжения с накопительным резервуаром или без него. Предлагаемый способ управления не требует аппаратных средств управления и может быть реализован на бюджетных программируемых логических контроллерах или регуляторах, обеспечивая при этом значительную экономию электроэнергии и природных ресурсов при сохранении достаточного уровня надежности системы при работе при низких температурах окружающей среды. Разработанная модель позволяет оптимизировать систему управления для конкретного объекта водоснабжения без серьезных предварительных полевых исследований, что снижает затраты на ввод системы в эксплуатацию.

Проект направлен на применение в системах водоснабжения малых и средних населенных пунктов и автономных предприятий, особенно тех, которые работают в условиях низких температур окружающей среды. Перспективами развития работы являются совершенствование алгоритма управления с использованием адаптивных технологий и разработка алгоритма высокоточной оптимизации с низкими требованиями. Для повышения надежности системы также целесообразно контролировать температуру воды в скважине и в резервуаре, регулируя расход таким образом, чтобы обеспечить нормальное функционирование всех элементов автоматизированного объекта.

Литература

1. Число объектов хозяйственно-питьевого централизованного водоснабжения. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
2. Утечки и неучтенный расход воды (тысяч кубических метров, объем показателя за год). Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
3. Число аварий в системе водопровода. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
4. 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;21(5):59-70.
5. Гуменова Р.Х., Черняховский В.А. Моделирование потребления электроэнергии приводами насосов при дроссельном и частотном регулировании производительности. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19(3-4):96-106.
6. Мустафин Э.Н. Применение регулируемых асинхронных двигателей в жилищно-коммунальном хозяйстве. В поиске компромиссного решения. Бюллетень строительной техники. Москва: Бст., 2018. № 3 (1003) С. 51-53.
7. Abidov K., Zaripov O., Zaripova S. Automatic drive-support method for constant pressure maintenance at pump units of the hydraulic power stations, E3S Web of Conf., 216 (2020) 01110DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601110>.
8. Kan E., Ikramov N., Mukhammadiev M. The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter, E3S Web Conf., 97 (2019) 05010
9. Pöyhönen S., Simola A.; Ahola J. Variable-speed-drive-based sensorless estimation of pump system reservoir fluid level, 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020; pp. P.1-P.10,
10. Rodriguez Arribas J.; Vega Gonzalez C. M. Optimal vector control of pumping and ventilation induction motor drives, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002; vol. 49, no. 4, pp. 889-895.
11. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A, et al Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive, 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018, pp. 30-31.
12. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(2):27-42.
13. Jahmeerbacus M. I. Flow rate regulation of a variable speed driven pumping system using fuzzy logic, 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, 2015; pp. 1-6.
14. He L., Song L. The pump house constant pressure fuzzy self-tuning PID control system simulation, 2011 International Conference on Electric Information and Control

Engineering, Wuhan, 2011; pp. 5525-5527.

15. Fulai Y.; Hexu S. Optimal control in variable-speed pumping stations, 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2011, pp. 2397-2401.

16. Палкин Г.А., Горбунов Р.В., Суворов И.Ф. и т.д. Способ регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике и цифровая система для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2593649. 10.08.2016. Бюл. № 22. Доступно по: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=ee50a00bd42fb65219a943ab3f25f61e>. Ссылка активна на 09 мая 2021.

17. Palkin G.; Suvorov I., Development of a simulation model of the first rise area of a water supply system with a storage reservoir. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 804-809.

18. Palkin G., Suvorov I and Gorbunov R. Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling, 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234.

Авторы публикации

Палкин Георгий Александрович – старший преподаватель кафедры Информатики, вычислительной техники и прикладной математики (ИВТ и ПМ), Забайкальский государственный университет (ЗабГУ).

Гайсин Азат Фивзатович – д-р техн. наук, профессор кафедры Физики, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. *Number of objects of household and drinking centralized water supply*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335>. Accessed: 09 may 2021.

2. *Leakage and unrecorded water consumption (thousand cubic meters, the value of the indicator for the year)*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034>. Accessed: 09 may 2021.

3. *Number of accidents in the water supply system*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186>. Accessed: 09 may 2021.

4. 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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>

5. Gumerova RK, Chernyakhovskiy VA. Modelling of electrical energy consumption of electrical drives in throttle and frequency regimes of control. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):96-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-96-106>

6. Mustafin EN. The use of regulated asynchronous motors in housing and communal services. In search of a compromise solution. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. Moskva: Bst., 2018. № 3 (1003) Pp. 51-53.

7. Abidov K, Zaripov O, Zaripova S. Automatic drive-support method for constant pressure maintenance at pump units of the hydraulic power stations. E3S Web of Conf., 216 (2020) 01110. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601110>

8. Kan E, Ikramov N, Mukhammadiev M. The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter. E3S Web Conf., 97 (2019) 05010 doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705010>

9. Pöyhönen S, Simola A, Ahola J. Variable-speed-drive-based sensorless estimation of pump system reservoir fluid level. 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020; pp. 1-P.10, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215786

10. Rodriguez Arribas J, Vega Gonzalez CM. Optimal vector control of pumping and ventilation induction motor drives. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002;49(4):889-895. doi: 10.1109/TIE.2002.801240

11. Kukishev D, Meshcheryakov V, Boikov A et al Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. 2018 X International Conference on Electrical Power

Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018, pp. 30-31. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784

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

13. Jahmeerbacus MI. *Flow rate regulation of a variable speed driven pumping system using fuzzy logic*. 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, 2015; pp. 1-6, doi: 10.1109/EPECS.2015.7368520

14. He L, Song L. *The pump house constant pressure fuzzy self-tuning PID control system simulation*. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, 2011; pp. 5525-5527, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777320

15. Fulai Y, Hexu S. *Optimal control in variable-speed pumping stations*. 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2011, pp. 2397-2401, doi: 10.1109/ICMA.2011.5985981.

16. Palkin GA, Gorbunov RV, Suvorov IF. et al. *Sposob regulirovaniya urovnya zhidkosti v emkosti-sbornike i tsifrovaya sistema dlya ego osushchestvleniya*. Patent RUS № 2593649. 10.08.2016. Byul. №22. Available at: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&idee50a00bd42fb65219a943ab3f25f61e>. Accessed 09 may 2021.

17. Palkin G, Suvorov I. *Development of a simulation model of the first rise area of a water supply system with a storage reservoir*. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 804-809, doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208073.

18. Palkin G, Suvorov I, Gorbunov R. *Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling*. 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369.

Authors of the publication

George A. Palkin – TransBaikal State University, Chita, Russia.

Azat F. Gaysin – Department of Physics, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 15.05.2021 г.

Отредактировано 28.05.2021 г.

Принято 08.06.2021 г.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

О.С. Рахимов¹, Д.Н. Мирзоев¹, Е.И. Грачева²

¹Политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими в город Худжанд, Республика Таджикистан

²Казанский государственный энергетический университет, Россия, г.Казань
E-mail: mdabir@mail.ru

Резюме. *ЦЕЛЬ.* За последние 3-4 года, в результате увеличения количества сельских хозяйств в Деваитичском районе Согдийской области Таджикистана, наблюдается непропорциональное распределение электроэнергии в сети 0,4 кВ (однофазное и трехфазное). Несимметрия токов фазных нагрузок по отношению к несимметричным фазным напряжениям на клеммах потребителей трехфазной сети вызывает дополнительные потери электроэнергии, которые составляют до 21% от нормативных потерь. В указе Президента Республики Таджикистан от 10 мая 2009 г. № 29 «Об энергосбережении и снижении потерь электроэнергии» указано, что существует необходимость исследования качества электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ и ее соответствия ГОСТ 32144. 2013 г., а также оценка потерь электроэнергии в распределительной структуре электрических сетей является важной задачей в области сельской электроэнергетики. *МЕТОДЫ.* Первичными материалами являлись: однолинейная схема сети 0,4 кВ с исходными параметрами, которые уточнялись в ходе обследования сети; токовые нагрузки отходящих линий. Экспериментальные исследования качества электроэнергии и оценка уровня потерь в низковольтной сети проводились с помощью комплексного измерительного прибора «Энерготестер» ПКЭ – А - С4. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Исследования позволили получить данные о суточных потреблениях электроэнергии в отдельных отходящих линиях, сведения о характеристиках потребителей, цифровая информация (база данных) о показателях качества электроэнергии в низковольтных сетях. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Установлено, что основными факторами влияющими, на уровень потерь электроэнергии в низковольтных сетях, являются: несоизмеримость мощности трансформаторов ТП и потребителей, неравномерность загрузки отдельных фаз, существенное влияния отдельных преобразовательных установок на качество ЭЭ. Прогнозируются меры по снижению потерь и повышению качества электроэнергии в низковольтных сельских сетях 0,4 кВ.

Ключевые слова: низковольтные сельские сети; потери; показатели качества электроэнергии; энергомониторинг.

Для цитирования: Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.

EXPERIMENTAL STUDY OF QUALITY AND ELECTRICITY LOSSES IN LOW VOLTAGE RURAL ELECTRIC NETWORKS

OS. Rakhimov¹, DN. Mirzoev¹, EI Grachieva²

¹Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Khujand city, Republic of Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

E-mail: mdabir@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Due to the increase in the number of farms in the Devashtichsky district of the Sughd region of Tajikistan, over the past 3-4 years, a disproportionate distribution of electricity in the 0.4 kV network has been observed. Unbalance currents of phase loads in relation to asymmetric phase voltages at the terminals of consumers of a three-phase network cause additional losses of electricity, which can reach 21% of the standard losses. In the decree of the President of the Republic of Tajikistan dated May 10, 2009 No. 29 "On energy saving and reduction of electricity losses" it is indicated that there is a need to study the quality of electricity in rural 0.4 kV networks and its compliance with GOST 32144. 2013, as well as an assessment of losses electricity in its distribution structure is an important task in the field of rural electricity. *METHODS.* A single-line diagram of a 0.4 kV network with initial parameters, which were refined during the survey of the network, and the current loads of outgoing lines were investigated. Experimental studies of the quality of electricity and assessment of the level of losses in the low-voltage network were carried out using a complex measuring device «Energotester» PKE - A - C4. *RESULTS.* The studies allowed obtaining data on the daily consumption of electricity in individual outgoing lines, information on the characteristics of consumers, digital information (database) on indicators of the quality of electricity in low-voltage networks. *CONCLUSIONS.* It has been established that the main factors influencing the losses of electricity in low-voltage networks are: incommensurability of the power of transformers of transformers and consumers, uneven loading of individual phases, a significant effect of individual converters on the quality of energy. Measures are forecasted to reduce losses and improve the quality of electricity in low-voltage rural networks of 0.4 kV.

Key words: low-voltage rural networks; losses; power quality indicators; energy monitoring.

For citation: Rakhimov OS, Mirzoev DN, Grachieva EI. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.

Введение

Согласно ГОСТ 32144-2013 качество электроэнергии определяется следующими параметрами: отклонением напряжения, колебаниями напряжения, несинусоидальностью тока и напряжения, несимметрией токов и напряжений, перенапряжением, импульсным напряжением, отклонением частоты и др. [1].

Разность между рабочим и номинальным напряжениями называется отклонением напряжения (ОН) и определяется выражением [2, 3].

$$\Delta U = U - U_{\text{ном}};$$
$$\Delta U\% = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}. \quad (1)$$

где $U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение, кВ; U - рабочее напряжение, кВ.

В трехфазных сетях в качестве рабочего напряжения принимается линейное напряжение. Согласно стандарту нормально допустимое значение ОН на выводах потребителей электроэнергии составляет $\pm 5\%$, а предельно допустимое значение $\pm 10\%$ от номинального напряжения электрической сети. Поэтому к понятию «отклонение напряжения» относятся изменения напряжения длительностью не менее 1 минуты [3, 4].

Колебания напряжения (КН) характеризуются размахом изменения напряжения δU_t и дозой фликера P_f . Источник колебаний напряжения в системах электроснабжения является мощным потребителем и зависит от изменения потребляемой активной и реактивной мощности. Величина изменения напряжения определяется разностью между значениями, следующих друг за другом, экстремумов горизонтального участка огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты, определяемых на каждом периоде.

Размах изменения напряжения δU_t в процентах вычисляется по следующему выражению [5, 6, 7]:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}} 100, \quad (2)$$

где U_i, U_{i+1} – значения следующих друг за другом экстремумов или экстремума на горизонтальном участке огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты.

Согласно ГОСТ 13109-97 и ГОСТ 32144-2013 продолжительность колебания напряжения электропитания менее 1 мин, в том числе быстрые изменения напряжения, является «дозой фликера». «Фликером» (термин «мерцание» ламп – перевод английского слова «flicker») называют субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения, а его дозой – мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени. При этом под «временем восприятия фликера» понимается минимальное время для субъективного восприятия человеком фликера, вызванного колебаниями напряжения определенной формы. Величину дозы фликера измеряют с помощью фликерметра – устройства, воспроизводящего математическую модель канала влияния этого процесса на зрение. [8, 9].

Из-за колебаний напряжения возникает кратковременная доза фликера P_{st} , которая измеряется с интервалом времени 10 минут, и длительная доза фликера P_{lt} , с интервалами 2 часа в заданной точке в линия электропередачи. В течение 100% интервала времени, в неделю кратковременная доза фликера не должна превышать 1,38 и длительная доза фликера не должна превышать 1,0 [10,11].

Кратковременная доза фликера в интервале 10 мин определяется следующим выражением [2]:

$$P_{st} = \sqrt{k_1 P_{0,1} + k_2 P_1 + k_3 P_3 + k_4 P_{10} + k_5 P_{50}}, \quad (3)$$

где $K_1 = 0,0314$ – для 0,1% уровня; $K_2 = 0,0525$ – для 1,0% уровня; $K_3 = 0,0657$ – для 3% уровня; $K_4 = 0,28$ – для 10% уровня; $K_5 = 0,08$ – для 50% уровня.

Если общие КН обусловлены рядом резкопеременных нагрузок, характеризующихся случайным характером работы (сварка, электродвигатели и др.), длительную дозу фликера P_{lt} за рассматриваемый промежуток времени находят, исходя из совокупности 10-минутных значений [10]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N P_{st}^3}, \quad (4)$$

Для сетей низкого напряжения, соответственно $P_{st} \leq 1$; $P_{lt} \leq 0,8$; $\delta U_t \leq 8\%$. Эти нормы определяют уровень электромагнитной совместимости.

Отклонение частоты (ОЧ) определяется как разность значения основной частоты напряжения источника питания от номинального значения:

$$\Delta f = f - f_{ном}, \quad (5)$$

где f – фактическое значение частоты, Гц, измеренное в интервале времени 10 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30; $f_{ном}$ – номинальная частота, Гц.

Номинальное значение частоты в электрической сети равно 50 Гц. Отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала за одну неделю [12,13].

Несинусоидальность напряжения (НН) характеризуется степенью искажения синусоидальности формы кривой напряжения. НН характеризуется величиной

коэффициента искажения кривой напряжения $k_{не}$ %, которая определяется отношением напряжению основной частоты U_1 или номинальным напряжением к действующему значению высшей гармоники напряжения U_v :

$$k_{не} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (6)$$

где U_v – действующее значение напряжения v - й гармоники, В; n – количество учитываемых гармоник.

Допустимое значение коэффициента не синусоидальности $k_{не}$ для напряжения 0,38 кВ равно 8,0 % и предельно допустимое значение $k_{не} = 12,0$ %. Согласно ГОСТ 13109-97 значения коэффициента v - й гармонической составляющей напряжения определяется по следующие формуле:

$$K_{U(v)} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100, \quad (7)$$

Не симметрия напряжения стабилизируется по параметрам основной частоты. Если амплитуды фазных напряжений и их сдвиг равны, то напряжение симметрично. Если в одном параметров есть нарушение, это означает что напряжение несимметрично. Для оценки несимметрии напряжения используется метод симметричных составляющих, а система синусоидального напряжения делится на три симметричных составляющих: прямую последовательность, обратной и нулевую последовательность. В соответствии с этой методикой также установлены показатели качества электроэнергии для оценки несимметрии напряжения [14, 15, 16]:

- коэффициент несимметрии напряжения обратной последовательности в сети 0,38 кВ определяется следующим выражением

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

- коэффициент несимметричного напряжения нулевой последовательности для четырехпроводной сети 0,38 кВ определяется по формуле

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% = \frac{U_{0(1)}}{U_{ном.ф}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $U_{2(1)}$ и $U_{0(1)}$ – напряжения нулевой и обратной последовательности; $U_{1(1)}$ – междуфазное напряжение прямой последовательности.

Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{1(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C); \\ U_{2(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C); \\ U_{0(1)} &= \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C). \end{aligned} \quad (10)$$

где U_A, U_B, U_C – напряжение фазы сети; $a = e^{j2\pi/3}$ – трехфазные системные операторы.

Провалы напряжения характеризуют внезапное снижение напряжения более чем на 10% от номинального напряжения $U_{ном}$ в заданных точках электрических сетей. Основная причина провалы напряжения - это попадание молнии в линии или шины открытых распределительных устройств. В этом случае происходит процесс короткого замыкания, когда срабатывают защитные устройства оборудования и системы автоматики (АПВ, АВР).

Провал напряжения характеризуется глубиной (минимальное значение напряжения) δU_n и длительностью времени провала Δt_n . Глубина провала напряжения рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{мин}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение трехфазной сети, В; $U_{мин}$ – остаточное или минимальное напряжение в контрольной точке электрической сети, В.

Длительность времени провала рассчитывается как разность между временем восстановления напряжения t_v и временем начала провала напряжения t_n :

$$\Delta t_n = t_v - t_n, \quad (12)$$

Длительность времени провала напряжения не может превышать 1 минуты.

Временное перенапряжение – повышение напряжения в точке сети выше $1,1U_{ном}$ продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях.

Несоответствие напряжения качества электроэнергии требованиям ГОСТ приводит к дополнительным потерям активной мощности в электрической сети.

В случае несинусоидального напряжения дополнительные потери в трансформаторе от высших гармоник тока определяются по следующей формуле [15].

$$\Delta P_{\Sigma \text{ в.г.тр.}} = 3 \sum_2^n I_{(n)}^2 r_1 k_{r(n)}, \quad (13)$$

где $I_{(n)}$ – электрический ток n -й гармоники; r_1 – активное сопротивление на основной частоте;

$k_{r(n)}$ – коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей в n -й гармоники. В расчетах принимают значение $k_{r(5)} = 2,1$; $k_{r(7)} = 2,5$; $k_{r(11)} = 3,2$; $k_{r(37)} = 6,08$; $k_{r(39)} = 6,24$.

Дополнительные потери от высших гармоник тока в линии электропередачи определяются согласно [2]. При этом коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей на частоте n -й гармоники $k_{r(n)} = \sqrt{n}$.

В сетях 0,4 кВ с нулевой проводом необходимо исследование дополнительных потерь от несимметрии токов нулевой последовательности. В соответствии с [16] формула для расчета потерь мощности в радиальных сетях с учетом несимметричных нагрузок фаз имеет вид:

$$\Delta P_{\text{ЛЭП}} = k_{ui} I_{\Sigma i}^2 r_{\Sigma i} k_{di}, \quad (14)$$

где k_{ui} – коэффициент количества фаз участка сети; $r_{\Sigma i}$ – активное сопротивление участка сети; k_{di} – коэффициент, учитывающий дополнительные потери от неравномерной загрузки фаз:

$$k_d = N_{\text{кв}}^2 \left(1 + 1,5 \frac{r_{ог}}{r_{фг}} \right) - 1,5 \frac{r_{ог}}{r_{фг}},$$

где $r_{ог}$, $r_{ф}$ – сопротивления нулевого и фазного проводов;

$$N_{\text{кв}}^2 = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2},$$

коэффициент неравномерности распределения фазных токов;

I_A , I_B , I_C – измеряемые токи отдельных фаз сети.

Согласно выражениям [13] и [14] суточные потери активной электроэнергии в сети равны:

$$\Delta W = (\Delta P_{\Sigma \text{ в.г.тр.}} + \Delta P_{\text{ЛЭП}}) \cdot 24, \quad (15)$$

$$\Delta W\% = \frac{\Delta W}{W} \cdot 100\%, \quad (16)$$

где W – суточное потребление активной электроэнергии, кВт·ч; $\Delta W\%$ – суточные потери активной электроэнергии, %.

Материалы и методы

Для оценки влияния показателей качества электроэнергии на потери электроэнергии в низковольтных сетях экспериментальные исследования проводились в характерной низковольтной сети села Угук Деваштичского района Согдийской области Республики Таджикистан. Исследования проводились с использованием комплексного цифрового электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4».

Измерительный прибор «Энерготестер ПКЭ-А-С4» производства «Марс-Энерго» позволяет, производить измерения и регистрацию основных показателей качества

электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013, а также других электрических параметров отдельных фаз таких, как ток, напряжение, мощность и электроэнергия в трехфазной четырехпроводной сети. Данное измерительное устройство может быть использовано для проведения энергомониторинга и энергоаудита в электрических сетях. Порядок ввода в эксплуатацию и настройки программного комплекса Энерготестер ПКЭ-А-С4 для обработки результатов исследований приведены в руководстве.

Внешний вид переносного электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4» показан на рисунке 1.

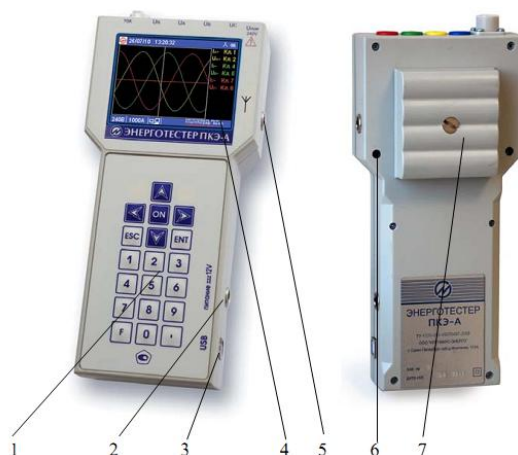


Рис. 1. Внешний вид электронного измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ-А-С4»:

1 - клавиатура; 2 - место подключения источника; 3 - USB для подключения к компьютеру; 4 - графическое окно; 5 - место установки антенны GPS; 6 - пломбированное место; 7 - место батареек

Fig. 1. Appearance of the electronic measuring device "Energotester PKE-A-C4":

1-keyboard; 2 - place of connection of the source; 3-USB for connection to the computer; 4-graphic window; 5 - place of installation of the GPS antenna; 6-sealed place; 7 - place of the battery.

Измерения и регистрация электрических параметров низковольтной сети 0,4 кВ выполнялись на участках, где в основном установлены однострановые подстанции с трансформаторами мощностью 160 кВА. Так например, от ТП 6785 с трансформатором 160 кВА питаются 183 дворовых хозяйств. В селе Угук всего имеется 420 дворовых хозяйств и других потребителей электроэнергии.

После проведения экспериментальных исследований обобщение и компьютерная обработка результатов производились с помощью прикладной программы *EmWorkNet_setup* и базы данных *PostgreSQL*.

Результаты

Обработка суточного мониторинга фазных и линейных напряжений сети 0,4 кВ показывают, что в отдельные часы суточные отклонения напряжения превышают максимально допустимое ГОСТом 32144-2013 значение $\pm 10\%$ и составляют (15 – 17)% (см. рис. 2 а и б)

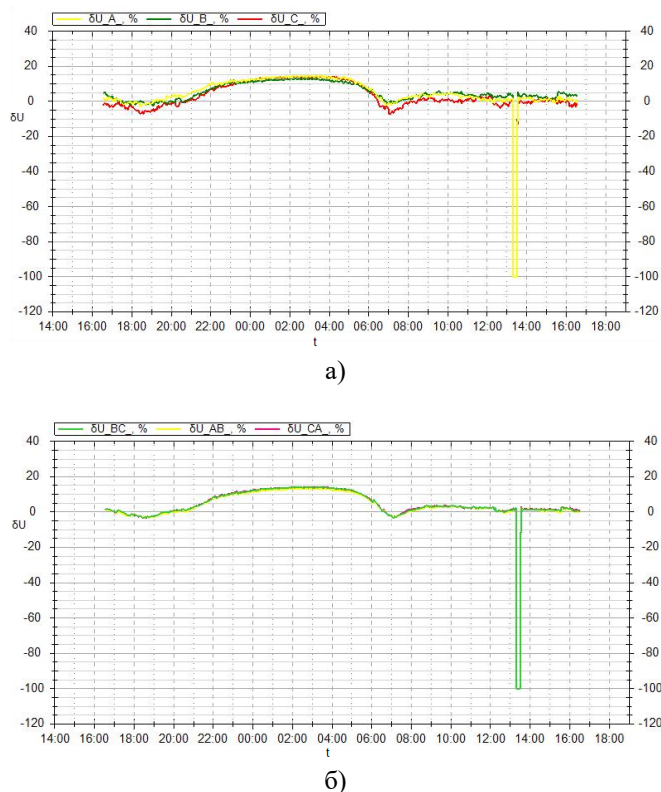


Рис. 2. Суточное отклонение фазного (а) и линейного (б) напряжения сети 0,4 кВ

Fig. 2. Daily deviation of the phase (a) and linear (b) mains voltage of 0.4 kV

Обобщенный график зависимости отклонений фазных напряжений сети (рис. 3) показывает, что в ночные часы напряжение отдельных фаз превышает номинальное значение на 5 – 7 %. В утренние и вечерние часы фазное напряжение отдельных фаз ниже номинального значения и несимметрично, что обусловлено неравномерностью загрузки отдельных фаз однофазными потребителями электроэнергии.

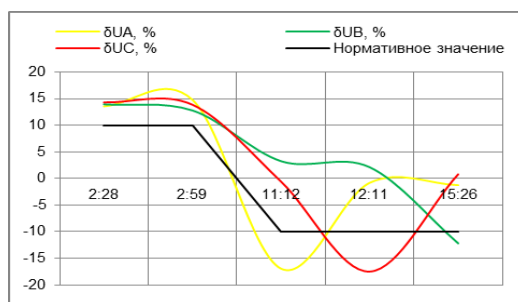


Рис.3. Отклонение фазного напряжения низковольтной сельской сети, превышающее норму

Fig. 3. Deviation of the phase voltage of the low-voltage rural network, exceeding the norm

Основными потребителями электроэнергии в селе Угук являются дворовые хозяйства (около 80 %), где в качестве электрических нагрузок установлены квартирное освещение и маломощные электробытовые приборы.

Результат суточного отклонения частоты (ОЧ) в сельской сети низкого напряжения приведен на рисунке 4.

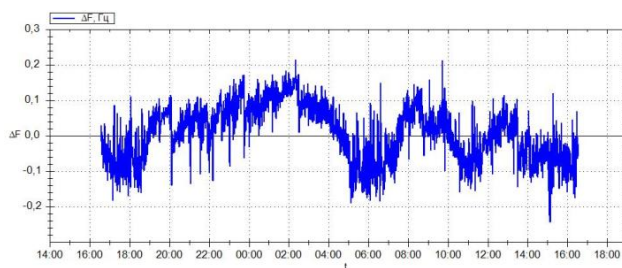


Рис. 4. Суточное отклонение частоты в сельской сети

Fig. 4. Daily frequency deviation in the rural network

Обобщенный график зависимости отклонения частоты в сельской сети приведен на рис. 5.

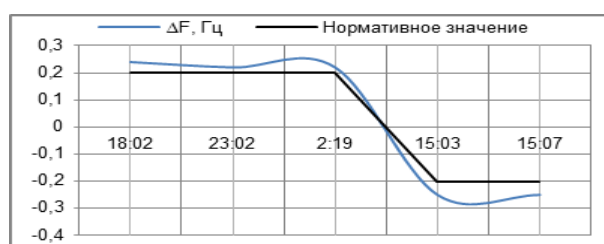


Рис. 5. Отклонение частоты сельской сети

Fig. 5. Rural network frequency deviation

Как показывает рисунок 5, наблюдается незначительное отклонение частоты от максимально допустимого ГОСТом значения $\pm 0,2$ Гц.

Анализ несинусоидальности формы кривой напряжения и тока в сети, показывает, что в сети преобладают нечетные гармоники (см. рис. 6).

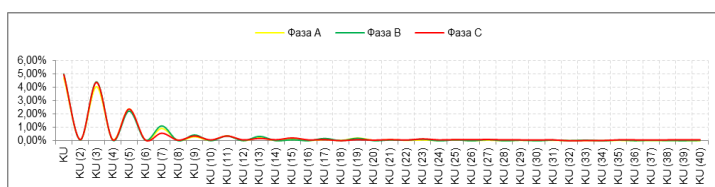


Рис. 6. Гармонический спектр частоты напряжения сельской сети

Fig. 6. Harmonic spectrum of the rural network voltage frequency

Результаты определения коэффициентов несимметрии фазных и линейных напряжений, оцениваемые симметричными составляющими нулевой и обратной последовательности, приведены на рисунке 7.

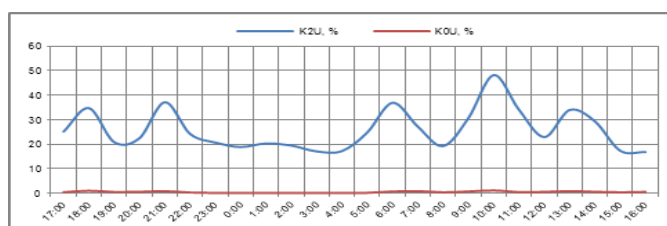


Рис. 7. Суточное изменение коэффициента несимметрии напряжения низковольтной сельской сети по симметричным составляющим нулевой и обратной последовательности

Fig. 7. Daily variation of the low-voltage rural network voltage asymmetry coefficient by the symmetric components of the zero and reverse sequence

Анализ коэффициентов несимметрии фазных напряжений и токов (см.рис. 8) показывает, что несимметрия напряжений и токов отдельных фаз имеют место в вечерние и дневные часы суток. Основной причиной возникновения несимметрии напряжений и токов фаз является неравномерность распределения нагрузок отдельных фаз. Как известно, несимметрия напряжений и токов приводит к дополнительным потерям мощности в отдельных элементах низковольтной сети [16].

Длительная доза фликера для низковольтных сетей не превышала 1, а кратковременная доза фликера - 1,38.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты измерений доз фликера приведены на рисунке 9. Как показывают результаты исследований, доза фликера превышает допустимые ГОСТом значения.

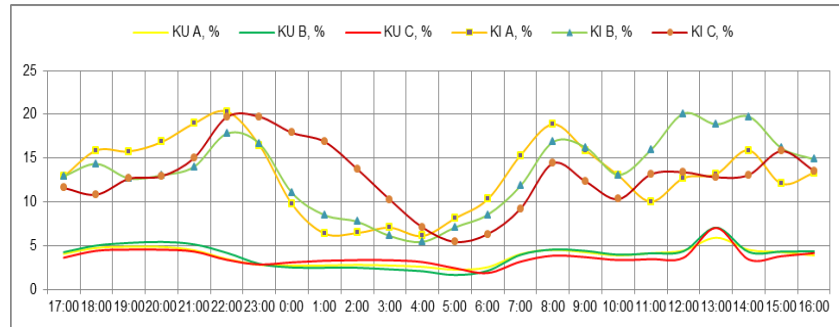


Рис. 8. Суточный график зависимости коэффициентов несимметрии токов и напряжений отдельных фаз низковольтной сети

Fig. 8. Daily graph of the dependence of the current and voltage asymmetry coefficients of individual phases of the low-voltage network

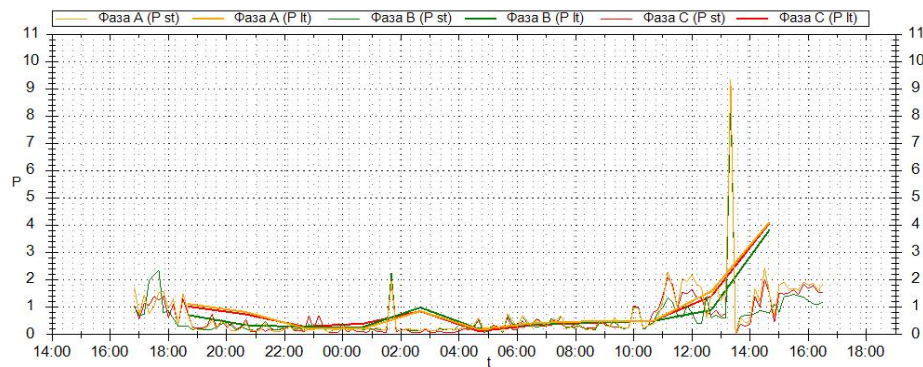


Рис. 9. Суточный график зависимости длительной P_{lt} и кратковременной P_{st} дозы фликера

Fig. 9. Daily graph of the dependence of the long-term P_{lt} and short-term P_{st} dose of the flicker

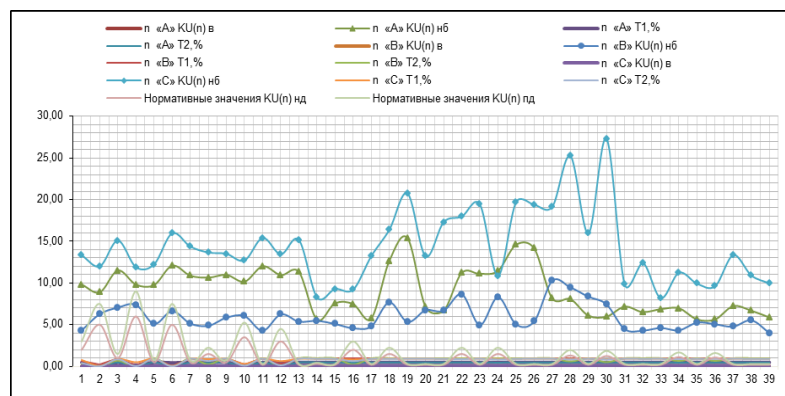


Рис. 10. Результаты измерения электрической энергии по коэффициенту n-й гармонической

Fig. 10. Results of measuring electrical energy by the coefficient of the nth harmonic component of phase

составляющей фазных напряжений

voltages

Это положение свидетельствует о соизмеримости мощности отдельных потребителей электроэнергии с мощностью трансформатора ТП, а следовательно, влияния пусковых характеристик отдельных потребителей на показатели качества электроэнергии, и как следствие, снижения уровня электромагнитной совместимости. Несоответствие доз фликера требованиям стандарта также приводит к миганию яркости осветительных приборов [7].

Высшие гармонические составляющие токов и напряжений характеризуются коэффициентами гармоник. На рисунке 10 приведены коэффициенты высших гармонических составляющих напряжений отдельных фаз до 39-й гармоники на шинах 0,4 кВ трансформаторов Т1 и Т2 ТП. Как видно из рисунка, коэффициенты 19, 28 и 30-ой гармоник в фазе С имеет максимальное значение и превышают нормативные значения.

Результаты определения коэффициентов фазового сдвига приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения коэффициентов фазового сдвига кривой напряжения

Измеряемая характеристика	Фаза «А»			Фаза «В»			Фаза «С»			Нормативное значение
	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	Результат измерений	T ₁ , %	T ₂ , %	
K _{УВ}	0	0,49		0	0,99		0	0,91		8
K _{Унб}	34,69		0,49	23,32		0,99	40,65		0,91	12
	Междуфазное АВ			Междуфазное ВС			Междуфазное СА			
K _{УВ}	0	0		0	0		0	0		8
K _{Унб}	4,14		0	6,34		0	4,39		0	12

Результаты таблицы 1 показывают, что коэффициент сдвига синусоидальности кривой небаланса напряжения фаз (K_{Унб} > 12) больше, чем нормативное значение, что указывает на несимметрию фаз. Коэффициенты сдвига синусоидальности кривой междуфазного напряжения меньше (K_{Унб} < 12), чем значение стандарта, соответствующего ГОСТ.

Результаты оценки провалов и перенапряжений в сельских сетях низкого напряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерения провалов и перенапряжений

Провал			
Напряжение	U _А	U _В	U _С
Количество	1	1	1
Суммарная продолжительность, с	00:14:09.016	00:14:09.037	00:14:09.071
Максимальная глубина, %	99,98	99,98	99,98
Перенапряжения			
Напряжение	U _А	U _В	U _С
Количество	13	15	6
Суммарная продолжительность, с	07:32:05.694	06:35:14.715	06:20:22.351
Максимальное перенапряжение	1,15	1,14	1,15

Данные таблицы 1 показывают, что провал напряжения в сети наблюдаются с 13:17 до 13:31, что подтверждается данными рисунка 7. В моменты времени 06:20, 06:35 и 07:32 в фазах сельской сети напряжение превышало норму, что негативно воздействует на работу электрооборудования.

Для определения потерь мощности в трансформаторах использовались исходные данные, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Параметры линии электропередачи и трансформатора				
ТП, кВА	r_{mp} , Ом	I_A , А	I_B , А	I_C , А
ТМ-160	4,35	31	42	43
ВЛЭП - 0,38 кВ				
$S_{ЛЭП}$, мм ²	L , км	r_{ϕ} , Ом	$N_{кв}^2$	k_d
25	1	1,14	1,02	1,1

По результатам экспериментального исследования с помощью Энерготестер ПКЭ-А суточная потребляемая электроэнергия мощность в селе Угук составила $W = 7681$ кВтч.

Потери активной мощности в трансформаторе показаны на рисунке 11.



Рис.11. Дополнительные потери активной мощности за счет высших гармоник в трансформаторе

Fig. 11. Additional active power losses due to higher harmonics in the transformer

Потери мощности от высших гармоник определяются согласно выражению 13. Как показывает рисунок 11, потери мощности от 37 и 39-ой гармоник имеют относительно большую величину и суммарные потери активной мощности от них составляют $\Delta P_{6,2} = 58,28$ кВт, с учетом токов отдельных гармоник $I_{(37)} = 18$ А, $I_{(39)} = 20$ А.

Потери мощности на ЛЭП – 0,38 кВ определяем по данным таблицы 3, с учетом выражения 14.

$$\Delta P_{ЛЭП} = 3 \cdot 38,56^2 \cdot 1,14 \cdot 1,1 = 5,59 \text{ кВт}$$

где ток в 3-х фазной сети принимается равным среднему значению фазных токов равно $I_{\phi} = 38,56$ А.

По потерям мощности в трансформаторе и ЛЭП определяем суточные суммарные потери активной электроэнергии в соответствии с формулами 14 и 15.

$$\Delta W = (58,28 + 5,59) \cdot 24 = 1532,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W\% = \frac{1532,88}{7681} \cdot 100\% = 19,96\%$$

Потери активной электроэнергии в сельской сети 0,38 кВ составляют 19,96%, из них 5,96 % нагрузочные и 14 % дополнительные потери за счет низкого качества электроэнергии в сети.

Обсуждение

В результате экспериментальных исследований установлено, что отклонение напряжения превышает нормы, установленные ГОСТ 32144-2013. Рисунок 2 (а, б) показывает, что отклонение фазного и линейного напряжения увеличилось с +10% до +15% с 23:00 до 05:00, а с 13:17 до 13:31 наблюдался провал напряжения. В период от 06:20 до 07:32 возникали перенапряжения 13 раз (см. таблицу 2). Нестандартные показатели отклонения напряжения отрицательно влияют на работу оборудования используемого в сельском хозяйстве. Например, при снижении напряжения на зажимах двигателя потребляемая мощность и ток увеличиваются и происходит нагрев обмоток двигателя. В результате срок службы двигателя сокращается. Повышение напряжения на зажимах двигателя приводит к увеличению расхода реактивной мощности. Также расход реактивной

мощности увеличивается с уменьшением коэффициента загрузки двигателя. В среднем на каждый процент увеличения напряжения потребление реактивной мощности увеличивается на 3% (в основном за счет увеличения холостого хода тока двигателя), что приводит к увеличению потерь активной мощности в электрических сетях 0,4 кВ. Отклонение напряжения также влияет на процесс световой поток ламп накаливания и люминесцентных ламп, а также отрицательно влияет на качество работы и срок службы бытовой техники (телевизор, холодильник, компьютер и др.).

На рисунке 5 показано, что отклонение частоты в интервале 18:00 до 02:19 составляет более +2 Гц, а с 15:00 до 15:07 от -2 Гц до -3 Гц. Изменение частоты с 49,9 до 49,5 Гц приводит к увеличению сигнала телевизионной техники почти в четыре раза выше нормы и отрицательно влияет на срок службы оборудования.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что при несоответствии показателей качества электроэнергии нормам ГОСТ в сельских электрических сетях 0,4 кВ возникают дополнительные потери. Потери напряжения и электроэнергии возникают из-за неравномерного распределения фазных нагрузок и появления высших гармоник фазных напряжений. Также было обнаружено, что потери активной мощности от высших гармоник составили 19,96%.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что:

- основными факторами влияющими, на возрастание потерь электроэнергии в низковольтных сетях, являются: несоизмеримость мощности трансформаторов ТП и потребителей, а также неравномерность загрузки отдельных фаз;
- имеет место существенное влияние отдельных преобразовательных установок на качество ЭЭ в сети и требуется установки фильтров высших гармоник;
- для обеспечения равномерности фазных напряжений на зажимах потребителей на отходящих фидерах ТП, необходимо установить автоматический выравниватель загрузки фаз, основанный на принципе мониторинга показателей качества электроэнергии в низковольтной сельской сети 0,4 кВ.

Литература

1. Виноградов А. и др. Повышение качества электроэнергии сельских потребителей за счет корректировки стоимости электроэнергии // Возобновляемые источники энергии и проблемы электроснабжения для сельских регионов. IGI Global. 2019. С. 312-341.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
3. Карчин В.В., Сидорова В.Т., Леухин А.Н. Улучшение показателей качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с помощью компенсации реактивной мощности. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. № (1-2). С. 61-67.
4. Лукина Г.В., Бондаренко С.И., Самаркина Е.В. Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии на физической модели сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством // «Вестник ИрГСХА». 2016. №72. С. 138-146.
5. Мирзоев Д.Н. Методы снижения потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения. 2019. С. 22-28.
6. Наумов И.В., Лукина Г.В., Сукиясов С.В., и др. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством // Вестник АлтГАУ им И.И. Ползунова. 2001. № 2. С. 49-56.
7. Немцев Г.А. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 372 с.
8. Рахимов О.С., Мирзоев Д. Н. Определение потерь электроэнергии моделированием низковольтных сельских электрических сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №. 4.

9. Савина Н.В., Бодруг Н.С. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. № 5-6. С.19-26.

10. Тульский В.Н., Иноятлов Б.Д., Джураев Ш.Д. Мониторинг качества электроэнергии как инструмент диагностики состояния нейтрали низковольтных кабелей // Энергетик. 2019. №. 6. С. 30-33.

11. Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. №20(11-12). С. 99-106.

12. Martinenas S., Knezović K., Marinelli M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. V. 32. №. 2. p. 971-979.

13. Tulsky V. N. et al. Study and analysis of power quality of electric power system. Case study: Republic of Tajikistan // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. p. 827-833.

14. Khosiljonovich K. I. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks // Energy and Power Engineering. 2016. V. 8. №. 6. p. 263-269.

15. Albu M. M., Sănduleac M., Stănescu C. Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. V. 8. №. 1. p. 485-492.

16. Ch Y., Goswami S. K., Chatterjee D. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. V. 83. P. 87-95.

Авторы публикации

Рахимов Охунбобо Сайфиiddинович – канд. техн. наук, и.о. профессора кафедры электроснабжения и автоматика Худжандский политехнический институт Таджикского технического университета имени акад. М.С. Осими.

Мирзоев Дабир Назирович – докторант кафедры электроснабжения и автоматика, Политехнический институт Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими в город Худжанде.

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

References

1. Vinogradov A. et al. Improving the power quality of rural consumers by means of electricity cost adjustment. *Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions*. IGI Global, 2019. P. 312-341.

2. Zhezhelenko IV, Sayenko YUL. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh*. 3-ye izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 2000. 252 P.

3. Karchin VV, Sidorova VT, Leukhin AN. The improvement of quality indicators electricity in the rural distribution networks of 0,4 kv by reactive power compensation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(1-2):61-67.

4. Lukina GV, Bondarenko SI, Samarkina EV. Experimental study of the quality indicators of electrical energy on a physical model of a 0.38 kV network with a balancing device. *Vestnik IrGSKhA*. 2016;72:138.

5. Mirzoyev DN. Metody snizheniya poter' elektroenergii v nizkovol'tnykh sel'skikh elektricheskikh setyakh. *Sovremennyye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniya*. 2019. P. 22-28.

6. Naumov IV, Lukina GV, Sukyisov SV, et al. The methodology of calculating indicators of the asymmetry of the currents and voltages in the network of 0.38 kV with balanced-to-unbalanced device. *The Reporter of ASAU of I.I. Polzunova*. 2001;2:49-56.
7. Nemtsev G.A. Upravleniye kachestvom elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2013. 372 P.
8. Rakhimov OS, Mirzoyev DN. Opredeleniye poter' elektroenergii modelirovaniyem nizkovol'tnykh sel'skikh elektricheskikh setey. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. №. 4.
9. Savina NV, Bodrug NS. The problem of normalizing electrical energy quality while transferring to intellectual electrical energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(5-6):19-26.
10. Tul'skiy VN, Inoyatov BD, Dzhurayev SH. D. Monitoring kachestva elektroenergii kak instrument diagnostiki sostoyaniya neytrali nizkovol'tnykh kabeley. *Energetik*. 2019;6:30-33.
11. Fetisov LV, Rozhencova NV, Bulatov OA. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106.
12. Martinenas S, Knezović K, Marinelli M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;32(2):971-979.
13. Tul'skiy VN. et al. Study and analysis of power quality of electric power system. Case study: Republic of Tajikistan. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. P. 827-833.
14. Khosiljonovich KI. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks. *Energy and Power Engineering*. 2016;8:6:263-269.
15. Albu MM, Sănduleac M, Stănescu C. Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016;8(1):485-492.
16. Ch Y, Goswami SK, Chatterjee D. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016;83:87-95.

Authors of the publication

Okhunbobo S. Rakhimov – Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi.

Dabir N. Mirzoev – Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi to the city of Khujand.

Elena I. Grachieva – Kazan State Power Engineering University.

Получено	01.06.2021 г.
Отредактировано	14.06.2021 г.
Принято	22.06.2021 г.

Сдано в набор 25.06.2021
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ № 5234
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная