



КГУ

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*

(25) 3 / 2023

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. 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	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV
Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	ВАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)- ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО "ФОЛИАНТ"
Адрес типографии:	420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2023
Т.25, № 3
Май-Июнь

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

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

ИВШИН И.В.	БРЯКИН И.В.	ЯКИМОВ Н.Д.
КАСИМОВ В.А.	СУСЛОВ К.В.	ІЛІҮА К. ІЛІЕҮ
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ФЕДОТОВ А.И.	ВАФИН Д.Б.
ДОВГУН В.П.	ЗВЕРЕВА Э.Р.	ІОН V ІОН
ГРАЧЕВА Е.И.	ЩИННИКОВ П.А.	НИКОЛАЕВА Л.А.
ИЛЮШИН П.В.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	КАЛАЙДА М.Л.
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	БОРИСОВ А.В.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.	АРАКЕЛЯН Э.К.	АНДРЕЕВ В.П.
STANIMIR VALTSHEV	ПАВЛОВ Г.И.	КОРНИЛОВ В.Ю.
PENTIU RADU DUMITRU	ДМИТРИЕВ А.В.	КОЗЕЛКОВ О.В.
KOLCUN MICHAEL	БОРУШ О.В.	
БОЧКАРЕВ И.В.	ЛАПТЕВ А.Г.	

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.

Power engineering: research, equipment, technology

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2023
Vol. 25, № 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:

ABDULLAZYANOV EDVARD YUNUSOVICH

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS,
SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT
ELECTRICITY
ECOLOGICAL SAFETY

Editorial board:

IGOR IVSHIN	BRIAKIN IVAN	ILIYA K. ILIEV
VASIL KASIMOV	SUSLOV KONSTANTIN	VAFIN DANIL
GOLENISHCHEV-KUTUZOV ALEXANDER	FEDOTOV ALEXANDER	ION V ION
DOVGUN VALERY	ZVEREVA ELVIRA	NIKOLAEVA LARISA
GRACHEVA ELENA	SHCHINNIKOV PAVEL	KALAIDA MARINA
ILYUSHIN PAVEL	MINGALEEVA GUZEL	BORISOV ANDREY
SAFIN ALFRED	VANKOV YURY	ANDREEV VICTOR
MESHCHERYAKOV VIKTOR	ARAKELYAN EDIK	KORNILOV VLADIMIR
STANIMIR VALTCHEV	PAVLOV GRIGORY	KOZELKOV OLEG
PENTIUC RADU DUMITRU	DMITRIEV ANDREY	
KOLCUN MICHAIL	BORUSH OLESYA	
BOCHKAREV IGOR	LAPTEV ANATOLY	
	YAKIMOV NIKOLAY	

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation
Tel./fax: +7 (843) 527-92-76
Printing House: LLC «FOLIANT»
Address of the printing house 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
Email: problems_ener@mail.ru
Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ХУСНУТДИНОВ Р.Р., МОЗЖУХИН Г.В., ХУСНУТДИНОВА Н.Р., САЛАХУТДИНОВ Б.М. Высокочастотный ЯКР сенсор для медицинских приложений.	3
ЦЫБРИЙ И.К., КОЗЕЛКОВ О.В., КОВАЛЬ Н.С. Разработка и испытание прибора для неразрушающего контроля твердых сплавов.	12

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

МАЛАФЕЕВ А.В. Выявление долевого вклада источников питания системы электроснабжения в потери электроэнергии и их стоимость.	24
МЕЩЕРЯКОВ В.Н., МАНТУХОВ Е.С., СДВИЖКОВ А.В. Исследование векторной системы управления асинхронным электроприводом конвейера ленточного типа с наблюдателями скорости.	41
САФИН А.Р., БАСЕНКО В.Р., НИЗАМИЕВ М.Ф., ЦВЕТКОВ А.Н., ПЕТРОВ Т.И. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта.	55
АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., АЛЬЗАККАР А., VALTCHEV S., МЕСТНИКОВ Н. П. Влияние вида графиков нагрузок на срок эксплуатации трансформаторов напряжением 33/11 Кв подстанции «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика).	65

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЗАЦАРИННАЯ Ю.Н., РЕУТИН Г.В., КУРИЛОВ С.С., ИСАЕВА О.В., КОВАЛЕВ Г.С. Прогнозирование выработки электроэнергии фотоэлектрической станции методами машинного обучения.	81
ЛОГУНОВ А.В., ШЛЫК Ю.К. Разработка алгоритма определения места повреждения кабельной линии с использованием ее амплитудно-фазовых координатных характеристик.	93

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

МОСТОВЕНКО Л.В., БЕЛОГЛАЗОВ В.П. Снижение аэродинамического сопротивления инерционно-вакуумного золоуловителя.	105
ЗИНУРОВ В.Э., ДМИТРИЕВ А.В., БИККУЛОВ Р.Я., ДМИТРИЕВА О.С., АБДУЛЛИНА А.А. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций.	117
БЕЖАН А.В., ЗВОНАРЕВА Ю.Н., ПОНОМАРЕВ Р.А. Снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области).	128
АХМЕТОВА И.Г., ЛАПИН К.В. Оптимальная периодичность изменения температуры теплоносителя на источнике теплоты и влияние скорости её изменения на потери тепловой энергии.	139

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

КАЛАЙДА М.Л., ШАРАФУТДИНОВ Р.Г. Особенности изменений водных биоресурсов куйбышевского водохранилища в современных климатических и гидрологических условиях.	150
---	-----

C O N T E N T S

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

KHUSNUTDINOV RR., MOZZHUKHIN GV., KHUSNUTDINOVA NR., SALAKHUTDINOV BM. High-q litz wire nqr sensor for medical applications.	3
TSYBRIY IK., KOZELKOV OV., KOVAL NS. Development and testing of a device for non-destructive testing of hard alloys.	12

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

MALAFEEV AV. Identification of the sharing contribution of the power supply system power sources to the electricity losses and their cost.	24
MESHCHERYAKOV VN., MANTUKHOV ES., SDVIZHKOV AV. Study of adaptive control system of asynchronous electric drive belt conveyor.	41
SAFIN AR., BASENKO VR., NIZAMIEV MF., TSVETKOV AN., PETROV TI. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging installations for electric transport.	55
ABDULLAZYANOV E.YU., GRACHEVA E.I., ALZAKKAR A., VALTCHEV S., MESTNIKOV N. Influence of the type of load graphs on the service life transformers 33/11 Kv at substation "Kabun-1" (Syrian Arab Republic).	65

ELECTRICITY

ZACARINNAYA YUN., REUTIN GV., KURILOV SS., ISAEVA OV., KOVALEV GS. Prediction of electricity generation from res by machine learning methods.	81
LOGUNOV AV., SHLYK YUK. Development of algorithm for determination of location of cable line damage using its amplitude-phase coordinate characteristics.	93

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

MOSTOVENKO LV., BELOGLAZOV VP. Reduction of aerodynamic resistance of inertial-vacuum ash collector.	105
ZINUROV VE., DMITRIEV AV., BIKKULOV RY., DMITRIEVA OS., ABDULLINA AA. Comparison of technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications.	117
BEZHAN AV., ZVONAREVA YUN., PONAMAREV RA. Reduction of the prime cost of thermal energy by the utilization of wind power plants in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas of the arctic zone of the Russian Federation (on the example of the Murmansk region).	128
AKHMETOVA IG., LAPIN KV. Optimal frequency of temperature change of a heat transfer agent on a heat source and the influence of the rate of change thereof on heat energy loss.	139

ECOLOGICAL SAFETY

KALAJDA M.L., SHARAFUTDINOV R.G. Features of changes in water bioresources of the kuibyshev reservoir under modern climatic and hydrological conditions.	150
--	-----

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-3-3-11

HIGH-Q LITZ WIRE NQR SENSOR FOR MEDICAL APPLICATIONS

RR. Khusnutdinov¹, GV. Mozhukhin², NR. Khusnutdinova^{1,3}, BM. Salakhutdinov¹

¹ Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

² Gebze Institute of Technology, Gebze, Turkey

³ St Petersburg University, Saint Petersburg, Russian Federation

khrr@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The design and development of radio frequency (RF) coil sensors is an important engineering and, at the same time, fundamental task for those radio spectroscopic instruments that require an increase in sensitivity, measured as a signal-to-noise ratio (SNR). Radio spectroscopy of nuclear quadrupole resonance (NQR), especially in nitrogen compounds, in which the resonant frequency is very low and ranges from a few megahertz or lower to hundreds of kilohertz, requires the use of special solutions to increase the sensitivity. *PURPOSE.* Theoretical substantiation and search for a technical solution that allows achieving high sensitivity on standard equipment through the use of a high-quality sensor. *METHODS.* Methods for optimizing the design of sensors for NQR/NMR spectrometers are considered. The design of the sensor for the NQR spectrometer, which contains an inductance coil wound with a Litz wire, has been calculated and designed. *RESULTS.* A high-quality coil for the spectrometer sensor was made, which gives an increase in the quality factor by about 1.5 times. The use of a spectrometer with this coil made it possible to confidently record weak noisy signals of paracetamol at a low duty cycle. The sensitivity of the sensor made it possible to distinguish preparations from different manufacturers by their spectral characteristics. *CONCLUSIONS.* A solenoid sensor has been developed, modeled and manufactured, which has a high quality factor and allows recording quadrupole resonance signals of drugs (paracetamol) by a non-destructive method directly through the package. The possibility of using such a sensor for quality control of medicines, detection of falsified and counterfeit medicines is shown.

Keywords: NQR 14N; quadrupole resonance sensor; litz wire RF coil; authentication of medicines.

For citation: Khusnutdinov RR, Mozhukhi GV, Khusnutdinova NR, Salakhutdinov BM. High-Q litz wire nqr sensor for medical applications. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3): 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-3-11.

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ ЯКР СЕНСОР ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Хуснутдинов Р.Р.¹, Мозжухин Г.В.², Хуснутдинова Н.Р.^{1,3}, Салахутдинов Б.М.¹

¹ Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

² ГТехнический университет Гебзе, Гебзе, Турция

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

khrr@yandex.ru

Abstract: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Проектирование и разработка радиочастотных (РЧ) датчиков катушек является важной инженерно-технической и, одновременно,

фундаментальной задачей для тех радиоспектроскопических приборов, в которых требуется увеличение чувствительности, измеряемое как отношение сигнал/шум (SNR). Радиоспектроскопия ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР), особенно в соединениях азота, в которых резонансная частота очень низка и составляет от единицы мегагерц или ниже - до сотен килогерц, требует применения специальных решений для увеличения чувствительности. **ЦЕЛЬ.** Теоретическое обоснование и поиск технического решения, которое позволяет добиться высокой чувствительности на стандартном оборудовании за счет применения высокочастотного датчика. **МЕТОДЫ.** Рассмотрены методы оптимизации конструкции датчиков для ЯКР/ЯМР спектрометров. Рассчитана, спроектирована конструкция сенсора для спектрометра ЯКР, содержащая катушку индуктивности, намотанную проводом типа литцендрат. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Изготовлена высокочастотная катушка для датчика спектрометра, дающая увеличение добротности примерно в 1,5 раза. Использование спектрометра с данной катушкой позволило уверенно регистрировать, слабые зашумленные сигналы парацетамола при низком коэффициенте заполнения. Чувствительность датчика позволило различить по спектральным характеристикам препараты разных производителей. **ВЫВОДЫ.** Разработан, смоделирован и изготовлен соленоидный датчик, обладающий высокой добротностью и позволяющий регистрировать сигналы квадрупольного резонанса лекарственных средств (парацетамол) неразрушающим методом непосредственно через упаковку. Показана возможность использования такого датчика для контроля качества лекарственных средств, выявления фальсифицированных и поддельных лекарств.

Ключевые слова: ЯКР 14N, датчик квадрупольного резонанса, литцендрат, рч, аутентификация лекарственных препаратов.

Для цитирования: Хуснутдинов Р.Р., Мозжухин Г.В., Хуснутдинова Н.Р., Салахутдинов Б.М. Высокодобротный якр сенсор для медицинских приложений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-3-11.

Introduction

The problem of pharmaceutical drugs quality is relevant all over the world. According to the World Health Organization in developing countries, one pill in 10 is adulterated. It may contain no active ingredient at all or contain less than necessary. According to official statistics, the share of fake (counterfeit, adulteration) drugs in the Russian Federation is 2-4%, according to unofficial data, the number of counterfeit drugs is much higher and reaches 10% for some positions. In Europe and North America, the percentage of low-quality drugs is lower than in Russia; in Asia and Africa, the proportion of counterfeit drugs reaches 50% for some popular types of drugs [1-5]. Another factor influencing the spread of counterfeit products is the increase in the online trade in medicines. Exercising control organizations use physical and chemical methods to test drugs. An obligatory set, as a rule, are methods of chemical analysis, chromatographic analysis, methods of IR spectroscopy, mass spectroscopy. Most of these research methods allow a qualitative analysis of the medicinal product for compliance with regulatory documentation. However, the existing analytical equipment has a number of disadvantages. For example, generally preliminary preparation of a test sample is required. The equipment is bulky and requires qualified personnel. The modern analytical method based on Raman scattering spectroscopy is devoid of the main disadvantages as non-destructive testing is provided, i.e. analysis can be carried out without damaging the packaging, and the scanners are portable and easy to operate [8-11]. At the same time, their use is limited by the requirements of the optical transparency of the medium, which means that it is impossible to study drugs in opaque packages and most tablets or powders in capsules. Therefore, the technique of nuclear quadrupole resonance (NQR) has outlook as a method for determining the quality of drugs, as it allows the study of chemical compounds in the solid phase directly in the package (in blisters, plastic and cardboard boxes and tubes) [10-12].

Literature Review

Nuclear quadrupole resonance (NQR) is a radiospectroscopy method based on the resonant absorption of electromagnetic energy in crystals, due to transitions between energy levels resulting from the interaction of the electric quadrupole moment of the nucleus with the electric field gradient (EFG) at the location of the nucleus. NQR is observed in solid mono- and polycrystalline compounds (also in frozen liquids) containing quadrupole nuclei, and the energy levels arising

from this interaction absorb and emit in the range from 0.1 to 10 MHz. Typical nuclei on which NQR is observed are ^{35}Cl , ^{37}Cl , ^{79}Br , ^{81}Br , ^{127}I , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{75}As , ^{63}Cu , ^{65}Cu , ^{14}N , ^{10}B , ^{11}B etc. Since the NQR resonance frequency is determined by the interaction between the quadrupole moment of the nucleus and the EFG tensor around the given nucleus, it is unique for a given chemical compound, the so-called passport. This circumstance made it possible to develop entire areas of research related to the search and detection of explosives and narcotic substances [13-15] since all explosives and most drugs contain quadrupole nitrogen ^{14}N . In the early 2000-s, a group of scientists from King's College proposed to use the NQR method to determine the authenticity of drugs. In addition, with the help of NQR it is possible to study the polymorphism of medicinal compounds [16].

The physics and technology of NQR is in many ways similar to nuclear magnetic resonance (NMR), with one very significant difference: pure NQR does not require a constant magnetic field. Therefore, NQR equipment is more compact and cheaper to manufacture. The main and serious problem that limits the use of NQR for such studies is the low sensitivity or the associated low signal-to-noise ratio. The amplitude of the NMR/NQR signals is related to the resonant frequency, and in NQR, for example, nitrogen frequencies lie in the range of 0.6–6 MHz, as a result, the transient signals induced in the sensor coil have amplitude of several μV , which is commensurate with the noise of the device itself. There are a large number of ways to increase the sensitivity, such as the use of multiple signal accumulation, the use of special multi-pulse sequences, the use, together with NQR, of sensors based on other methods, such as giant resistive resistance or SQUID, a combination of NQR and NMR, two- and three-frequency techniques, improvement of the sensor design [17-20].

Materials and Methods NQR Probe design

The NQR sensor of the spectrometer must simultaneously perform two main functions. On the one hand, it must create a high radio frequency field to excite all quadrupole nuclei, and on the other hand, it must be sensitive to register very small (a few microvolts) NQR signals. Traditionally, RLC oscillatory circuits tuned to the resonant frequency are used for these purposes. The test sample is placed inside, as a rule, a solenoidal inductor. For a number of specific tasks, such as mine detection, flat coils are used, with a sample containing quadrupole nuclei located outside the coil. The main parameters of the oscillatory circuit are its active and reactive resistances, impedance and also the quality factor of the circuit. A detailed calculation of the circuit elements for parallel and series oscillatory circuits is given in [21, 22]. For a series oscillatory circuit shown in Fig. 1, the expressions are as follows:

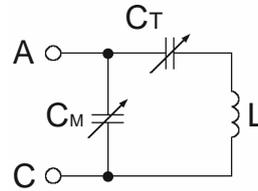


Fig.1 The series oscillatory circuit

The impedance between points A and C is:

$$Z_{AC} = \frac{\left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_T} \right) \cdot j\omega C_M}{\left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_T} \right) + j\omega C_M} \quad (1)$$

where R is the resistance of the coil at the resonant frequency $\omega=2\pi f$, where f is the frequency; C_M and C_T capacitances of the matching and resonant capacitor, respectively, L is the inductance of the coil. Simplifying the expression and removing negligible terms and separating the real and imaginary parts separately, we get:

$$Z_{AC} = \frac{R}{\omega^2 C_M^2 R^2} - j \frac{(\omega^2 L C_T - 1)(\omega^2 L C_T C_M - C_M - C_T)}{\omega^2 C_M^2 C_T^2 R^2} \quad (2)$$

In order to match with the output stage of the power amplifier, it is necessary to provide a resistance of the real part of expression (2) equal to 50Ω . To do this, it is necessary that the circuit be tuned to the resonant frequency by adjusting the values of C_M and C_T in such a way that the relation is fulfilled:

$$\frac{R}{\omega^2 C_M^2 R^2} = 50 \Omega \quad (3)$$

The value should be:

$$C_M = \frac{1}{\omega \sqrt{50R}} \quad (4)$$

For maximum sensitivity, it is necessary to achieve several indicators simultaneously. The oscillatory circuit must be tuned to resonance and, at the same time, be matched with the output stage of the spectrometer; it must have a low ohmic resistance and a high quality factor, must withstand the impact of powerful radio frequency pulses (up to several kW), retaining its characteristics, while being easily tuned to other frequencies. Therefore, the design of the sensor, its material, winding method, shape and cross-section of conductors are carefully calculated and selected to achieve optimal parameters.

The sensor scheme is shown in Fig.2. Here C_M is a capacitor for matching the output impedance of the power amplifier with the input impedance of the sensor - a Jennings 5-500 pF variable vacuum capacitor, C_T is a similar capacitor for tuning the circuit into resonance. Additionally, high-quality ceramic capacitors from ATC were used. The cross-diodes are designed to protect the preamplifier from high RF pulses.

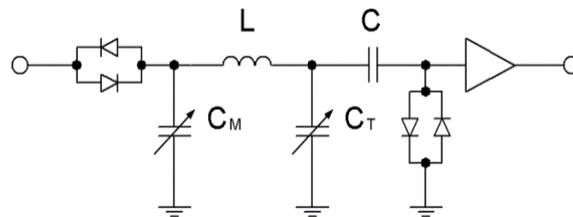


Fig.2. The NQR sensor scheme

The sensor coil is one of the most critical elements. Requirements are also imposed on it for low active resistance on the one hand and a sufficiently high inductance on the other. The dimensions of the coil must allow for completely non-destructive measurements for various types of drugs. Their packaging can be in the form of a rectangular cardboard box in which blisters with compressed tablets are packed, or in the form of a plastic tube containing gelatin capsules.

The quality factor of a series circuit consisting of a coil and a capacitor depends on the quality factor of both of them. But taking into account the fact that the quality factor of the capacitor is much greater than the quality factor of the inductor coil, it is the quality factor of the coil that turns out to be decisive for the oscillatory circuit. The quality of the capacitor has a strong influence on the quality factor of the circuit as a whole, but since the further selection of the inductor used the same set of capacitors for both cases, the further calculation concerns only the coil.

The sensor coil was wound with $N = 65$ turns of copper wire with a diameter of 0.6 mm on a frame made of PVC pipe with a diameter of $D = 50 \text{ mm}$. All available samples of paracetamol were placed in such a coil, both in blister packs and in plastic tubes. There are several formulas that allow you to calculate the inductance from a solenoidal coil, taking into account its parameters. The range of inductance values was from $140 \mu\text{H}$ to $240 \mu\text{H}$. The most accurate value of $169 \mu\text{H}$ also takes into account not only the geometric dimensions of the frame, but also the ratio of the coil winding length to its diameter as follows:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 D \Phi \quad (5)$$

In this expression

$$\Phi = \frac{\pi^2}{\alpha} \left(1 - \frac{4}{3\pi\alpha} + \frac{1}{8\alpha^2} \right) \quad (6)$$

Where $\alpha = l / D = 0,84$ is the ratio of the length of the winding to the diameter of the frame.

The quality factor of the coil is calculated by the formula

$$Q = \frac{2\pi fL}{R_{AC}} \quad (7)$$

In this expression, the denominator is the loss impedance for alternating current at a given frequency. Despite a large number of studies on this topic, there is still no single algorithm for calculating losses with alternating current from the basic works of Butterworth 1926 [23] and R.G.Medhurst [24].

At the same time, the exact calculation of losses is not an easy task. The most profound and detailed consideration of this issue is given by David W. Knight in his works [25, 2].

Losses at radio frequencies are caused by three factors: dependence on the material of the conductor, the influence of the skin effect, the influence of the proximity effect. The first factor can be ignored, since the copper material used has a rather low resistivity value and, in comparison with the skin effect, the influence of this effect is much less. Of course, you can use metals with lower resistivity, such as silver, but then this will lead to an increase in cost, with a very small gain. The phenomenon of the skin effect is manifested in the fact that at radio frequencies the currents in the conductor flow in a thin near-surface layer, increasing the resistance to alternating current. Despite the fact that the frequency is "boundary" to take into account the influence of the skin effect, it was decided to take into account the skin effect.

The proximity effect is due to the interaction of the radio frequency field of adjacent turns of the coil, eddy currents arise in them, which, in combination with skin effect currents, add losses. The value is determined by the ratio between the winding pitch and the diameter of the wire, as well as between the length and diameter of the coil. According to the table from [27], for a coil with the parameters used in the article, this coefficient is equal to $\Psi=5.8$.

Thus, total resistance is

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \Xi \cdot \Psi \quad (8)$$

The thickness of the layer δ in which the entire current is enclosed more precisely, the depth at which the current density decreases by $e=2.71$ times is determined by expression (9):

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (9)$$

Where ρ is metal resistivity [Om.m], f is frequency [Hz], $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, μ_r - relative permeability.

The influence of the skin effect is introduced as a coefficient Ξ , which shows how many times the resistance to alternating current at a given frequency is greater than the resistance to direct current.

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \Xi$$

Taking into account the influence of losses on proximity, the total resistance will be considered as (8)

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot \Xi \cdot \Psi$$

The classical calculation using the area of the ring in which the current passes, limited by

the radius of the wire r and the penetration depth δ gives:

$$A_{eff} = \pi(2r - \delta^2) \quad (10)$$

Then, taking into account the classical expression for the resistance to direct current $R_{DC} = \rho l / A$, where $A = \pi r^2$

We obtain

$$\Xi = r^2 / (2r - \delta^2) \quad (11)$$

Having carried out calculations taking into account losses due to the skin effect and the proximity effect, we obtain an increase in losses by about 8 times. The inductance of the solenoid coil is calculated by formula (5). Having carried out calculations for our coil, we obtained the value of the coefficient Ξ equal to 3.9. The value of the coefficient Ψ turned out to be 5.8. Thus, the quality factor of the coil, taking into account losses, turned out to be 191. The adequacy of the calculations was also confirmed by calculations in the online calculators of the Coil32.com portal. In addition, having carried out measurements on the device “Q-meter E4-4”, the values $L = 156 \mu\text{H}$, $Q = 195$ were obtained, which also confirms the adequacy of the calculations. This is a fairly good value for RF coils used for NQR spectroscopy. However, for our purposes, where the fill factor of the coil will be very small, due to the fact that the volume of tablets in the blister will be uneven and occupy a very small part of the volume of the coil, this value turned out to be insufficient to obtain transient signals.

As an optimization of the coil parameters, it was decided to reduce the loss resistance, get rid of the skin effect and reduce the influence of the proximity effect by using a Litz wire. Such solution should lead to an increase in the quality factor of the coil and, consequently, the oscillatory circuit, the sensor of the spectrometer as a whole.

Result

As a result, the calculation of a litz wire coil is given below. To reduce the losses associated with the skin effect in practice the replacement of a single-core wire with a litz wire is used 3, which is a bundle of a large number of thin conductors, where each has lacquer insulation in a common silk or lamsan insulation. Thus, there is a gain due to the larger surface area of a large number of conductors.

The coil was wound with 105/48 AWG litz wire. Loss resistance parameters were calculated using New England Wire Technology <https://www.newenglandwire.com/traditional-litz-wire-theory>.

For this wire containing 105 strands with a diameter of 0.03 mm each, the total diameter was 0.43 mm, taking into account the outer silk insulation. According to the calculations using the above method, the loss resistance to the skin effect and the proximity effect is:

$$\Xi = 1,0076 \quad \Psi = 3,9$$

$$\text{While } R_{DC} = 0,237 \text{ Ом/м}$$

$$\text{Including losses } R_{AC} = 0,93 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

The inductance of the coil wound with a litz wire appeared 172 μH and the final quality factor calculated by expression (5) turned out to be 291. Here for the total resistance value, a wire length of 10.21 m is taken into account.

This value turned out to be about 50% higher than the quality factor of a coil with a conventional wire. This difference was sufficient to obtain an NQR signal from paracetamol [28, 29]. If we evaluate the effect of the quality factor on the measurement sensitivity, then according to [14] the voltage amplitude of the induced signal is approximately equal to:

$$V = \omega I M \sqrt{Q Z_{AC} / \omega L},$$

where $\omega = 2\pi f$ is frequency, I is the magnitude of the current induced by the sample, M is the magnetization induced in the coils by currents I .

For a coil wound with a litz wire, the amplitude value turned out to be 30% larger compared to a conventional wire.

Comparison with conventional coils made according to the technology published in [11,12] and our Litz wire coil shows an increase in the quality factor by about 1.5-1.7 times, which leads to an increase in the signal-to-noise ratio and, consequently, to a reduction in detection time by about 1.5 times. This is important as a large number of measurements are required for drug authentication purposes.

Further research involves expanding the range of drugs containing other quadrupole nuclei and creating a prototype of a compact drug authenticity scanner.

Experiment

Measurements were performed on a spectrometer Apollo Tecmag. NQR experiments were carried out on Apollo Tecmag NQR/NMR console (0.1-100 MHz) with two-channel transmitter and one-channel receiver modules. Two Tomco BT-00500-Beta power amplifiers with output power of up to 500 W have been used. The detector unit includes transcoupler, a quarter wave lines π - filter 1,5-3.6 MHz bandwidth, a low-noise single-channel preamplifier Miteq and signal sensor. The coil described above was used as a sensor, complete with Jennings 5-500 pF vacuum capacitors and fine tuning with ATC capacitors. For measurements, samples of the medicinal compound "Paracetamol" of various brands from different countries - Turkey, Italy, Czech Republic, Russia, India, etc. containing 500 mg and 1000 mg of the active substance were purchased. The measurements were carried out at room temperature using a multi-pulse sequence of double spin-locking, which is a sequence of two series of 90-degree pulses separated by an interval for signal accumulation and recording. The pulse duration and the interval between pulses varied over a wide range and were selected according to the echo signal maximum. At the NQR transition frequency of 2.564 MHz, the most optimal pulse durations were 30 μ sec, the interval between pulses was 2000 μ sec. The number of pulses in the 1024 series, the signal recording time is 2.56 ms (the number of gates is 512 with an interval of 5 μ s). The experiment using such a sensor makes it possible to obtain spin echo signals. The width of the lines for different manufacturers is different, which allows you to confidently distinguish paracetamol from different manufacturers (see Table1). The reasons for this difference can be different - the presence of moisture, impurities, the difference in the composition of the auxiliary ingredients, the density of the tablet, etc. Discussion of these reasons is beyond the scope of this article.

Table1

Spin echo linewidth of paracetamol from different manufacturers

Medicine name	The linewidth, Hz
Parol_A_(Tur)	865
Parol_(Tur)	793
Panadol_(Che)	1305
Panadol_(Rus)	1080
Paracetamolo_(Ita)	350
Paracetamol_(Rus)	1245
Paralen_(Che)	980
Tachspirina1000_(Ita)	827
Tachspirina500_(Ita)	970
Merimol650_(Ind)	940

Conclusion

Measurement of quadrupole resonance signals of very small amplitude, in most cases covered by noise of various nature, is a rather tricky engineering problem. Most often, this problem is solved in a complex way - equipment, multi-pulse sequences, mathematical signal processing. The choice of the optimal sensor design for the spectrometer is one of the main ways to solve this problem. Therefore, solutions that give even a small, few percent gain, can help to pull the signal out of the noise, especially when measuring the NQR characteristics of low nitrogen compounds (0.5 - 6 MHz). The quality factor of coil makes it possible to increase the sensitivity, and therefore the proposed solution of replacing the wire with a litz wire turned out to be effective, despite the fact that the measured frequencies approached the limit of applicability of the influence of this effect.

References

1. World Health Organization (WHO). *Substandard and falsified medical products*. [Abstract]. Available at: https://www.who.int/health-topics/substandard-and-falsified-medical-products#tab=tab_1. Accessed: 25 May 2023.

2. Bagozzi D. *WHO-led anti-counterfeiting coalition examines technologies to prevent fake drugs*. In: World Health Organization (WHO); 13 March 2007. Prague; 2007. Available at: <https://www.who.int/news/item/13-03-2007-who-led-anti-counterfeiting-coalition-examines-technologies-to-prevent-fake-drugs>. Accessed: 25 May 2023.
3. The European Commission (EC). *Pharmaceutical Products—information and safety measures proposed by the EU*. [Abstract]. Available at: http://ec.europa.eu/news/business/081210_1_en.htm. Accessed: 25 May 2023.
4. The European Commission (EC). *European Commission—Counterfeit Medicines*. [Abstract]. Available at: http://ec.europa.eu/enterprise/pharmaceuticals/counterf_par_trade/counterfeit_en.htm. Accessed: 25 May 2023.
5. The European Commission (EC). *Millions of counterfeit drugs seized in the EU*. [Abstract]. Available at: <http://www.neurope.eu/articles/91132.php>. Accessed: 25 May 2023.
6. Chen H, Lin Z, Tan C. Application of near-infrared spectroscopy and class-modeling to antibiotic authentication. *Anal Biochem*. 2020;590:113514. doi:10.1016/j.ab.2019.113514.
7. Assi S, Khan I, Edwards A, et al. On-spot quantification of modafinil in generic medicines purchased from the Internet using handheld Fourier transform-infrared, near-infrared and Raman spectroscopy. *J Anal Sci Technol*. 2020:113514. doi:10.1186/s40543-020-00229-3.
8. Dégardin K, Guillemain A, Klespe P, et al. Packaging analysis of counterfeit medicines. *Forensic Sci Int*. 2018; 291:144-157. doi:10.1016/j.forsciint.2018.08.023.
9. Eliasson C, Matousek P. Noninvasive authentication of pharmaceutical products through packaging using spatially offset Raman spectroscopy. *Anal Chem*. 2007;79(4):1696-1701. doi:10.1021/ac062223z.
10. SwarupBhunia, Soumyajit Mandal. Detecting fake pills with nuclear quadrupole resonance. *IEEE Spectrum*. Available at: <https://spectrum.ieee.org/detecting-fake-pills-with-nuclear-quadrupole-resonance/>. Accessed: 25 May 2023.
11. Barras J, Althoefer, K, Rowe MD, et al. The Emerging Field of Medicines Authentication by Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy. *Applied Magnetic Resonance*. 2012;43(4). doi:10.1007/s00723-012-0320-2.
12. Barras J, Murnane D, Althoefer K, et al. Nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance spectroscopy: a promising analytical methodology for medicines authentication and counterfeit antimalarial analysis. *Anal Chem*. 2013;85(5):2746-2753. doi:10.1021/ac303267v.
13. Miller, Joel B. and Geoffrey A. Barrall. Explosives detection with nuclear quadrupole resonance. *American Scientist*, 93. 2005: 50-57.
14. Garroway AN, Buess MN, Miller JB, et al. Remote Sensing by Nuclear Quadrupole Resonance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(6): 1108-1118. doi:10.1109/36.927420.
15. Apih T, Rameev BZ, Mozhukhin GV, et al. Explosives Detection using Magnetic and Nuclear Resonance Techniques, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht, Netherlands: Springer, 168 p.
16. Trontelj Z, Pirnat J, Jazbinšek V, et al. Nuclear Quadrupole Resonance (NQR)—A Useful Spectroscopic Tool in Pharmacy for the Study of Polymorphism. *Crystals*. 2020;10(6):450. doi:10.3390/cryst10060450.
17. Pannetier-Lecoœur M, Fermon C, Dyvorne H, et al. ^{14}N NQR Detection of Explosives with Hybrid Sensors, In: *Explosives Detection using Magnetic and Nuclear Resonance Techniques*. 2009. Springer, Pp. 31-40. doi:10.1007/978-90-481-3062-7_2.
18. Seliger J, Zagar V. Double resonance experiments in low magnetic field: dynamic polarization of protons by (^{14}N) and measurement of low NQR frequencies. *J. MagnReson*. 2009;199(2):199-207. doi:10.1016/j.jmr.2009.05.001.
19. He DF, Tchiki M, Itozaki H. Detecting the ^{14}N NQR signal using a high $-T_c$ SQUID. *IEEE Transactions on applied superconductivity*. 2007;17(2): 843-845. doi:10.1109/TASC.2007.898204.
20. Mozhukhin GV, Rameev BZ, Khusnutdinov RR, et al. Three-frequency composite multipulse nuclear quadrupole resonance (NQR) technique for explosive detection. *Applied Magnetic resonance*. 2012;43(4):547-556. doi:10.1117/12.923625.
21. Hemnani P, Rajarajan AK, Joshi G, et al. (2020) Design of probe for NQR/NMR detection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2020;10(4): 3468-3475. doi: 10.11591/ijece.v10i4. pp3468-3475.
22. Majewski A, Walker M. *Design of Impedance Matching Networks for NMR and NQR Studies in the HF Band*. Department Of Physics, University of Florida, 2016. Available at: <http://www.phys.ufl.edu/~majewski/letters/match.pdf>. Accessed: 25 May 2023.

23. Butterworth S. Effective Resistance of inductance Coils at Radio Frequencies. *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*. 1926;3:203,267,417,483.
24. Medhurst RG.H. F. Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids. *Wireless Engineer*, Feb 1947 pp.35-43, Mar 1947 pp.80-92.
25. Knight DW. An introduction to the art of Solenoid Inductance Calculation. With emphasis on radio-frequency applications. Available at: <https://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/Solenoids.pdf>. Accessed: 25 May 2023.
26. Knight DW. Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors. doi:10.13140/RG.2.1.3865.1284. Available at: <https://www.g3ynh.info/zdocs/comps/Zint.pdf>. Accessed: 25 May 2023.
27. Knight DW. Solenoid Impedance and Q. Available at: <https://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/SolenoidZ.pdf>. Accessed: 25 May 2023.
28. Khusnutdinov RR. Hardware and program system for determination of authenticity of medicines by nuclear quadrupole resonance method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):119-131. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-119-131.
29. Khusnutdinov RR, Mukhamedshin I.R. Vozmozhnost' yadernogo kvadropol'nogo rezonansa dlya razlicheniya paratsetamola raznykh proizvoditelei i raznykh form (partii) otodnogo i togo zhe proizvoditelya po spektral'nym kharakteristikam. In: *Sbornik tezisov 15-i mezhdunarodnoishkoly-konferentsii «Magnitnyirezonansi ego prilozheniya»*; 1–6 Apr 2018; St.Petersburg, Russia. pp. 187-189.

Authors of the publication

Rustem R. Khusnutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Georgy V. Mozhukhin – Gebze Institute of Technology, Gebze, Turkey.

Naira R. Khusnutdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; St Petersburg University, Saint Petersburg, Russia.

Bulat M. Salakhutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено 15.06.2023 г.

Отредактировано 20.06.2023 г.

Принято 06.07.2023 г.



РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Цыбрий И.К.¹, Козелков О.В.², Коваль Н.С.¹

¹Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
koval-nc@mail.ru

Резюме: Актуальность работы заключается в необходимости осуществления контроля режущих сменных пластин металлообрабатывающего инструмента, имеющего широкое распространение на сегодняшний день в производстве и используемого при механической обработке изделий различного назначения в машиностроении. Изготовление твердосплавных пластин предусматривает ряд операций: получение мелкодисперсных порошков, их смешивание в определенных пропорциях, формообразование с последующим прессованием и спеканием. Нарушение технологии хотя бы одной из рассмотренных операций приводит к выпуску бракованных пластин, качество которых не соответствует требованиям. Применение таких пластин в производстве приводит к выпуску бракованных изделий или повышению трудоемкости их изготовления, что связано с необходимостью их частой замены. Традиционные методы контроля имеют значительный недостаток – разрушение изделия или его повреждение. Избежать их можно, используя методы неразрушающего контроля, к которым относится метод коэрцитивной силы. Авторами предложен прибор оригинальной конструкции, позволяющий реализовать неразрушающий контроль рассматриваемых изделий, изготовленных из твердых сплавов различных марок. Для проверки его работоспособности разработан опытный образец и осуществлены испытания. **ЦЕЛЬ.** Разработка прибора для неразрушающего контроля изделий из твердых сплавов и его испытание с целью определения относительной погрешности. **Задача актуальна,** поскольку существует потребность предприятий в контроле качества сменных твердосплавных пластин металлообрабатывающего инструмента. **МЕТОДЫ.** В ходе испытаний прибора использовались общепринятые эмпирические методы исследований, а определение относительной погрешности осуществлялось согласно методике, разработанной для коэрцитиметра Koerzimat 1.097 HcJ¹, и с помощью общепринятых методов математической статистики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны электрическая структурная и принципиальная схемы прибора, определены его конструктивные параметры. Проведены испытания прибора, в ходе которых произведены измерения коэрцитивной силы для образцов, изготовленных из различных марок твердых сплавов и имеющих различную форму и размеры. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Конструкция разработанного прибора отличается простотой и низкой стоимостью, вместе с тем в его основе положена современная элементная база. Результаты испытаний прибора показали нахождение относительной погрешности измерения в допустимых границах, что позволяет его использовать для контроля изделий из твердых сплавов в условиях производства.

Ключевые слова: коэрцитиметр; твердые сплавы; коэрцитивная сила; неразрушающий контроль; относительная погрешность; контроль качества изделий.

Для цитирования: Цыбрий И.К., Козелков О.В., Коваль Н.С. Разработка и испытание прибора для неразрушающего контроля твердых сплавов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 12-23. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-12-23.

¹ Методика поверки коэрцитиметра Koerzimat 1.097 HcJ. МП 28-261-2017. Технические описания. - Екатеринбург.: ФГУП «УНИИИМ», 2017. – 13 с.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A DEVICE FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HARD ALLOYS

IK. Tsybriy¹, OV. Kozelkov², NS. Koval¹

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

koval-nc@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the work lies in the need to control the cutting inserts of metalworking tools, which are widely used today in production and used in the machining of products for various purposes in mechanical engineering. The production of carbide plates involves a number of operations: obtaining fine powders, mixing them in certain proportions, shaping, followed by pressing and sintering. Violation of the technology of at least one of the considered operations leads to the production of defective plates, the quality of which does not meet the requirements. The use of such plates in production leads to the production of defective products or an increase in the complexity of their manufacture, which is associated with the need for their frequent replacement. Traditional control methods have a significant drawback - the destruction of the product or its damage. They can be avoided using non-destructive testing methods, which include the coercive force method. The authors proposed a device of an original design, which makes it possible to implement non-destructive testing of the considered products made of hard alloys of various grades. To test its performance, a prototype was developed and tested. *THE PURPOSE.* Development of a device for non-destructive testing of products made of hard alloys and its testing in order to determine the relative error. The task is relevant, since there is a need for enterprises to control the quality of replaceable carbide inserts of metalworking tools. *METHODS.* During testing of the device, generally accepted empirical research methods were used, and the determination of the relative error was carried out according to the methodology developed for the Koerzimat 1.097 HcJ coercimeter, as well as using generally accepted methods of mathematical statistics. *RESULTS.* The electrical structural and principal diagrams of the device have been developed, and its design parameters have been determined. Tests of the device were carried out, during which measurements of the coercive force were made for samples made of various grades of hard alloys and having different shapes and sizes. *CONCLUSION.* The design of the developed device is characterized by simplicity and low cost; at the same time, it is based on a modern element base. The test results of the device showed that the relative measurement error is within acceptable limits, which allows it to be used to control products made of hard alloys in production conditions.

Keywords: *coercimeter; hard alloys; coercive force; unbrakable control; relative error; product quality control.*

For citation: Tsybriy IK, Kozelkov OV, Koval NS. Development and testing of a device for non-destructive testing of hard alloys. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3): 12-23 doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-12-23.

Введение

Значительная часть изделий машиностроения подвергается механической обработке сборным режущим инструментом, оснащенным режущими пластинами. Их форма и размеры разнообразны. Для обеспечения высокой стойкости инструмента при производительных режимах резания, используют режущие пластины из спеченных керамических твердых сплавов, например BK8, BK15, T15K6. Снижение ресурса работы таких изделий или их поломка происходит главным образом из-за наличия поверхностных и объемных дефектов, неравномерности структуры по объему. Несмотря на значительное разнообразие дефектов, для их выявления широко применяют методы неразрушающего контроля (НК), в частности магнитные методы [1,2], основанные на анализе взаимодействия магнитного поля с объектом контроля. При этом происходит регистрация магнитных полей рассеяния над дефектами или магнитных свойств контролируемого объекта. Весьма перспективным является метод, основанный на определении коэрцитивной силы [3]. Его применение в производстве подразумевает использование специальных приборов – коэрцитиметров. С их помощью создается возможность оценки напряженно-деформированного состояния изделия, определение

степени и глубины упрочненного слоя. В работах [4-6] приводятся сведения о хорошей корреляционной зависимости магнитных, электромагнитных и механических свойств сталей и сплавов, которые определяются структурным состоянием, химическим и фазовым составами вещества. Возможна оценка таких параметров, как остаточные напряжения и микротвердость поверхностного слоя, значительно влияющих на эксплуатационные характеристики изделия и напрямую влияющие на ресурс его работы. В связи с этим, разработка и совершенствование коэрцитиметров является актуальной задачей на сегодняшний день.

Целью работы является установление возможности применения прибора оригинальной конструкции, разработанного авторами, реализующего метод неразрушающего контроля на основе оценки величины коэрцитивной силы. Для этого разработан опытный образец прибора и проведены испытания, включающие комплекс экспериментальных исследований. Совокупность теоретических исследований, позволивших разработать прибор и результаты экспериментальных исследований, полученных в результате его испытаний позволят расширить область знаний о неразрушающем контроле в целом и о приборах рассматриваемого типа в частности. Полученные авторами результаты исследований могут быть использованы при проектировании коэрцитиметров и организации неразрушающего контроля на производстве изделий из твердых сплавов рассматриваемых размеров и конфигурации различного назначения

Литературный обзор

Значительный вклад в становлении и развитии магнитных методов НК внесен учеными как М.Н. Михеев, Р.И. Янус, В.К., Аркадьев, Ф.Ферстер, Н.Н. Зацепин, В.Е. Щербинин, Г. В. Бида. Внедрение автоматизированных устройств и приборов контроля стало возможно благодаря трудам П.К.Ощепкова, В.В.Клюева, Л.А. Хватова. На сегодняшний день активно ведутся работы в этом направлении Российскими и зарубежными учеными [7-13].

В зависимости от размеров и конструкции объекта контроля, коэрцитиметры реализуют измерение в замкнутой, частично замкнутой либо в разомкнутой магнитных цепях. Если поверхность контролируемого объекта простой конструкции, чаще всего используют П-образные приставные преобразователи. Измерение осуществляется для определенной части объекта контроля, через которую осуществляется замыкание магнитного потока. Если изделие имеет сложную форму и малые размеры, применяют преобразователи проходного типа, представляющие собой соленоид с измерительной катушкой или с устройством для измерения напряженности размагничивающего поля. В этом случае контроль производится для объекта контроля в целом. В соответствии с действующими стандартами, статические магнитные характеристики и параметры образцов рекомендовано определять на установках типа У5045 и БУ-3². Различают коэрцитиметры переменного и постоянного тока. Первые обладают значительным преимуществом, благодаря возможности осуществления контроля при различных амплитудах токов. Однако исследований в этой области проводится недостаточно. Стоит отметить, что в последние годы при построении приборов предпочтение отдается цифровой схемотехнике. Это объясняется возможностью получения более высоких характеристик и дополнительных функций.

Особое место из-за своей специфики занимает НК изделий из спеченных твердых сплавов. Их получают методом порошковой металлургии, в числе операций которой входят: получение мелкодисперсных порошков, смешивание в требуемой пропорции, прессование и спекание. Соблюдение технологии производства обеспечивает получение требуемых физико-механических свойств таких изделий. Среди рассматриваемых изделий ярким представителем являются режущие и опорные пластины режущего металлообрабатывающего инструмента. Их размеры составляют десятки миллиметров, а формы весьма разнообразны: круглые, многогранные, треугольные и т.д. Значение коэрцитивной силы составляет от нескольких единиц до десятков кА/м. В связи с этим чаще производят контроль всего изделия в разомкнутых магнитных цепях [14, 15].

Материалы и методы

Авторами разработан опытный образец коэрцитиметра переменного тока, обеспечивающий реализацию коэрцитивного метода НК с использованием феррозонда. Значение коэрцитивной силы вычисляется без отображения петли гистерезиса. На

² ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1980. – 21 с.

рисунке 1 приведена структурная схема коэрцитиметра.

Блок стабилизации напряжения получает питание от сети 220В и включает в себя тороидальный трансформатор, обеспечивающий возможность получения выходного переменного напряжения в пределах 220-300В. Измерительный блок состоит из соленооида и измерительной катушки.

Объект контроля располагается во внутренней части соленооида по центру, подвергаясь воздействию электромагнитного поля наибольшей напряженности. ЭДС с выводов измерительной катушки поступает в блок обработки сигнала. На его входе предусмотрен модуль получения сигнала, осуществляющий преобразование двухполярного входного сигнала в однополярный с инверсией отрицательной составляющей.

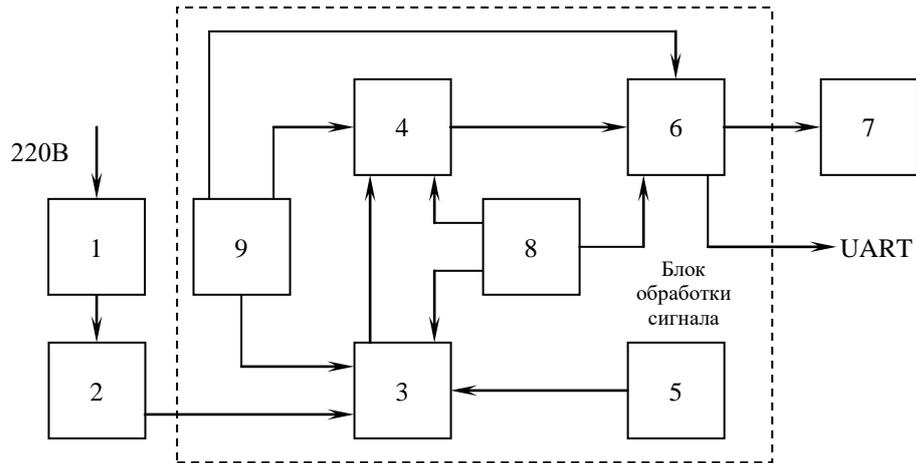


Рис. 1. Электрическая структурная схема коэрцитиметра: 1 – блок стабилизации напряжения; 2 – измерительный блок; 3 – модуль получения сигнала; 4 – модуль управления; 5 – вольтметр; 6 – модуль обработки сигнала, расчета и вывода результатов; 7 – дисплей; 8 – органы управления; 9 – блок питания

Fig.1. Electrical block diagram of the coercimeter: 1 - voltage measurement unit; 2 - measuring block; 3 - signal receiving module; 4 - control module; 5 - voltmeter; 6 - signal processing module, calculation and output of results; 7 - display; 8 - controls; 9 - power supply

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Так же происходит масштабирование сигнала для обеспечения нормальной работы операционного усилителя. Контроль выходного напряжения осуществляется вольтметром. Далее сигнал поступает в модуль управления, который осуществляет передачу его в следующий модуль, где производится расчет значения коэрцитивной силы и вывод на дисплей или ПК. Рассмотренные модули подключены к блоку питания.

На основе структурной схемы разработаны электрические принципиальные схемы. На входе блока стабилизации (рис.2) предусмотрен предохранитель F1 для защиты от перегрузки.

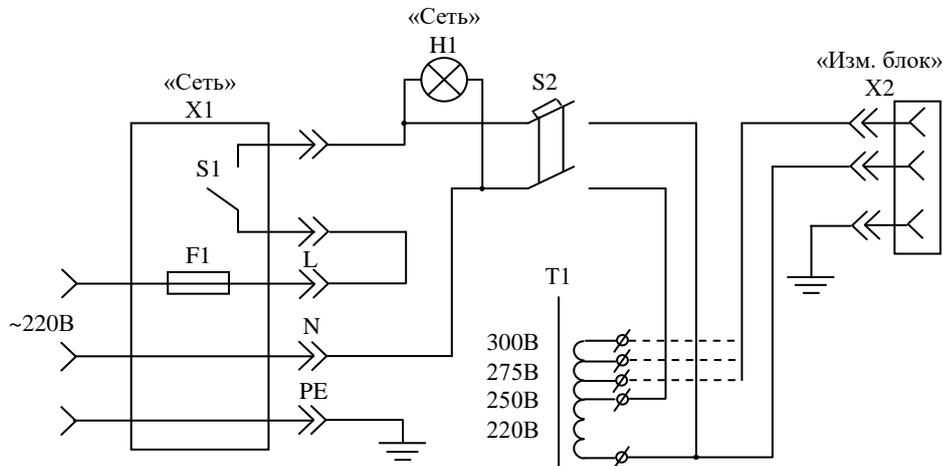


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блока стабилизации напряжения

Fig.2. Electrical circuit diagram of the voltage stabilization unit

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Кнопка *S1* осуществляет включение и выключение питания блока, а светодиод *H1* является индикатором питания. На входе обмоток трансформатора установлен двухполюсный автоматический выключатель *S2*. Тороидальный трансформатор имеет четыре обмотки, обеспечивающие значение выходного напряжения от 220 до 300 В. Подключение к измерительному блоку осуществляется через разъем *X2*.

Электрическая схема блока обработки сигнала представлена на рисунке 3. Двухполярное напряжение питания поступает через разъем *X1*, а сигнал с измерительной катушки – *X2*. Для подключения переменного резистора, необходимого для масштабирования сигнала предусмотрен разъем *X4*. Напряжение размаха входного сигнала не должно превышать 30В для обеспечения нормальной работы операционного усилителя *LM358N*. Схема позволяет управлять вводом сигнала в АЦП модуля обработки сигнала, расчета и вывода результатов. Он реализован в виде платы *Arduino nano*, которая построена на базе микроконтроллера *ATmega328p*. Микропроцессор ожидает нажатия кнопки (сигнал подается на вывод *CTRL*), подключаемой к разъему *X5*. После ее срабатывания, на выводе *REL* формируется сигнал, управляющий реле *K1*, контакт реле замыкается и измерительный сигнал (+) коммутируется с выводом *SGN*. Вывод результатов расчетов на ПК осуществляется через монитор *COM*-порта с помощью специализированного программного обеспечения или на дисплей *LCD1604* по протоколу *I2C*.

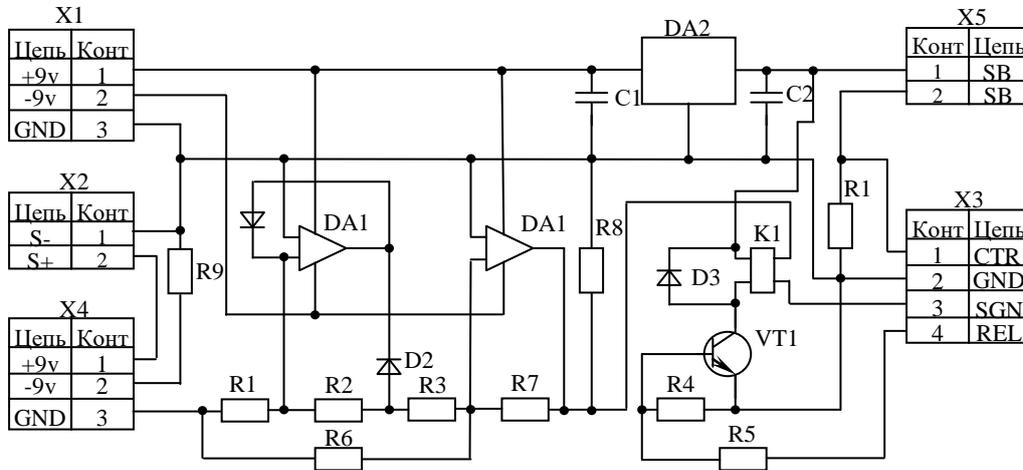


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока обработки сигнала Fig.3. Electrical circuit diagram of the signal processing unit

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Конструктивно измерительный блок коэрцитиметра состоит из корпуса, в котором расположен соленоид (рис.4). Последний представляет собой каркас, изготовленный из пластмассовой трубки на наружной поверхности, которой находится обмотка. Внутри соленоида, соосно с ним расположена измерительная катушка. Контролируемое изделие должно помещаться в центре внутренней части соленоида.

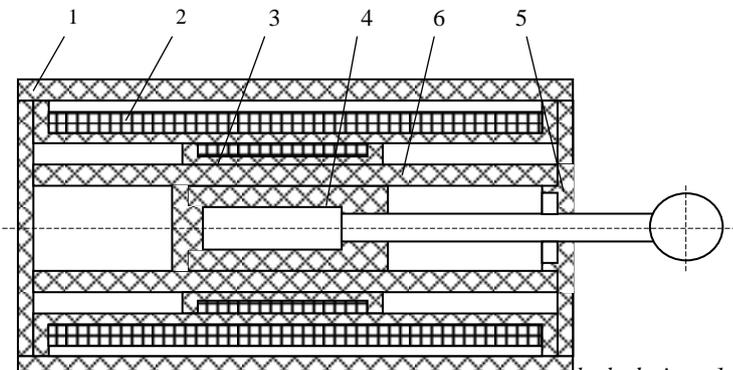


Рис. 4. Конструкция измерительного блока Fig.4. Measuring block design: 1 - body; 2 - корпус; 2 – соленоид; 3 – измерительная катушка; 4 – досылатель; 5 – ограничитель; 6 – трубка

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для этого предусмотрена пластиковая труба, внутри которой перемещается специальное устройство – досылатель. Конструктивно он представляет собой стержень с ручкой на одном конце и специальную насадку для базирования деталей различной конструкции на другом. Для расположения детали при контроле в центре соленоида предусмотрен ограничитель. Учитывая внутренний диаметр соленоида 50 мм, максимальные размеры контролируемого изделия составили: $\varnothing 48 \times 40$ мм.

Величина напряженности магнитного поля в центре соленоида определялась по формуле (1). Параметры соленоида представлены в таблице 1.

$$H = \frac{I \cdot n}{2} \frac{L}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \quad (1)$$

где I – сила тока, А;
 n – число витков соленоида;
 L – длина соленоида, м;
 R – радиус соленоида, м;

Таблица 1
 Table 1

Параметры соленоида
 Solenoid Parameters

Параметр	Значение
Ток в обмотках, А	4
Марка провода	ПЭВ-2
Диаметр провода (с изоляцией), мм	1,28
Число витков обмотки, шт	7000
Наружный диаметр соленоида, мм	109
Длина соленоида, мм	400
Расчетная напряженность в центре соленоида, кА/м	27,7
Расчетная напряженность по краям соленоида, кА/м	13,85

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

После изготовления соленоида производилось измерение действительного значения напряженности магнитного поля соленоида с помощью магнитометра модели МН 05. В качестве первичного преобразователя использовался датчик Холла, погрешность измерения не превышала 5%. Схема измерения представлена на рисунке 5.

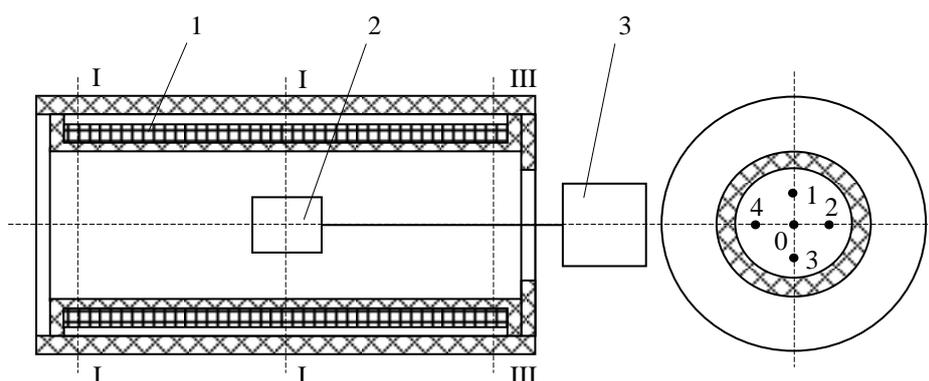


Рис. 5. Схема измерения напряженности магнитного поля соленоида: 1 – соленоид; 2 – преобразователь; 3 – магнитометр
 Fig.5. Scheme for measuring the magnetic field strength of the solenoid: 1 - solenoid; 2 - converter; 3 - magnetometer

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчет измерительной катушки сводился к выбору размеров каркаса и способа укладки провода, его диаметра и числа витков. Длина каркаса должна быть на 5-10 мм больше длины контролируемого изделия. Чувствительность катушки может быть найдена по формуле (2). Параметры катушки представлены в таблице 2.

$$K = \frac{E}{B} = \frac{8\pi\lambda H(R_2^3 - R_1^3)}{3D^2} f \quad (2)$$

где λ – коэффициент, учитывающий вид намотки провода;

f – частота изменения магнитного поля, Гц;

H – высота катушки, мм;

R_1 – внутренний радиус обмотки, мм;

R_2 – внешний радиус обмотки, мм;

D – диаметр обмоточного провода, мм;

Таблица 2

Table 2

Параметры измерительной катушки

Parameters of the measuring coil

Параметр	Значение
Высота катушки H , мм	40
Марка провода	ПЭЛ
Диаметр провода (с изоляцией), мм	0,55
Внутренний радиус каркаса, мм	14
Внутренний радиус обмотки, мм	18
Внешний радиус обмотки, мм	20,75
Число витков обмотки, шт	400
Чувствительность, мВ/мТл	192,9

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Внешний вид коэрцитиметра представлен на рисунке 6.

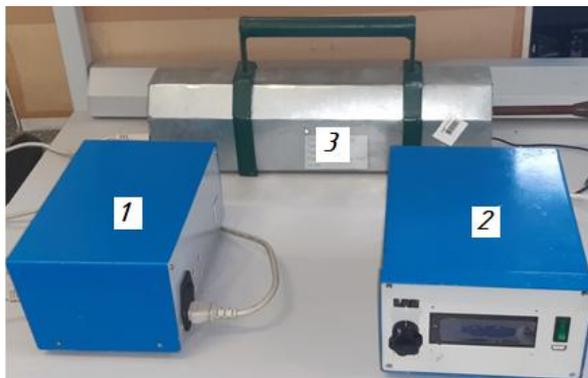


Рис. 6. Внешний вид коэрцитиметра:

1 – блок стабилизации напряжения; 2 – блок обработки сигнала; 3 – измерительный блок

Fig.6. Appearance of the coercimeter:

1 – voltage stabilization unit; 2 – signal processing unit; 3 – measuring block

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В качестве объекта контроля использовались режущие пластины металлообрабатывающего инструмента, изготовленные из твердых сплавов ВК8, ВК25, Т15К6 (рис.7).

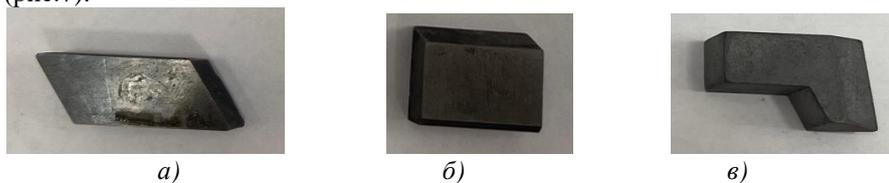


Рис. 7. Форма режущих пластин:

a – параллелограмм; b – прямоугольная; c – сложной формы

Fig.7. Blade shape: a - parallelogram; b -

rectangular; c - complex shape

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для определения относительной погрешности использовались эталонные значения коэрцитивной силы, полученные с помощью баллистической установки БУ-3, предназначенной для определения статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов с относительной погрешностью, не превышающей $\pm 2\%$. Измерение осуществлялось для двух образцов, соответствующего типа. Каждый образец измерялся девять раз.

Относительная погрешность измерений коэрцитивной силы для каждого образца определялась по формуле:

$$\delta = \frac{t \cdot S_{Hc} + \sqrt{3} S_{\Theta}}{S_{Hc} + S_{\Theta}} \sqrt{S_{Hc}^2 + S_{\Theta}^2} \quad (3)$$

где t - коэффициент Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности P и числа результатов измерений n (для $P = 0,95$ и $n = 10$, $t = 2,262$);

S_{Hc} - относительное среднее квадратическое отклонение среднего арифметического измерения коэрцитивной силы;

S_{Θ} - относительное среднее квадратическое отклонение не исключенной систематической погрешности определения коэрцитивной силы.

$$S_{Hc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Hc_i - \overline{Hc})^2}{n(n-1)}} \frac{100}{\overline{Hc}} \quad (4)$$

где Hc_i - результат измерений коэрцитивной силы соответствующего образца, кА/м;

\overline{Hc} - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы, кА/м.

$$S_{\Theta} = \frac{\delta_y + \delta_{Hc}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

где δ_y - относительная погрешность измерений коэрцитивной силы установки (2%);

δ_{Hc} - отклонение значения коэрцитивной силы образца, измеренного на коэрцитиметре от измеренного на установке.

$$\delta_{Hc} = \frac{|\overline{Hc} - Hcy|}{Hcy} 100 \quad (6)$$

где \overline{Hc} - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы на коэрцитиметре, кА/м;

Hcy - среднее арифметическое измерений коэрцитивной силы на установке, кА/м;

Результаты и обсуждение

На рисунке 8 приведен график, отражающий степень расхождения расчетных и измеренных значений напряженности магнитного поля на оси соленоида (точка о рис.5) в различных сечениях.

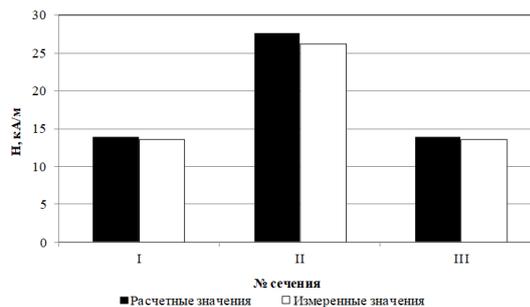


Рис. 8. Напряженность магнитного поля в различных сечениях соленоида вдоль его оси
 Fig.8. Magnetic field strength in various sections of the solenoid along its axis

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Величина расхождения фактических и расчетных значений напряженности электромагнитного поля в различных сечениях соленоида не превышает 3%. Наличие первичной ошибки соленоида обусловлено несовершенством размеров и формы каркаса, что приводит к недостаточной плотности намотки провода, а так же неравномерностью его сечения по длине.

Неравномерность исследуемой характеристики в остальных точках сечений рабочей зоны соленоида не превышает 1% (рис.9). В целом полученные результаты указывают на возможность использования соленоида для проведения дальнейших исследований.

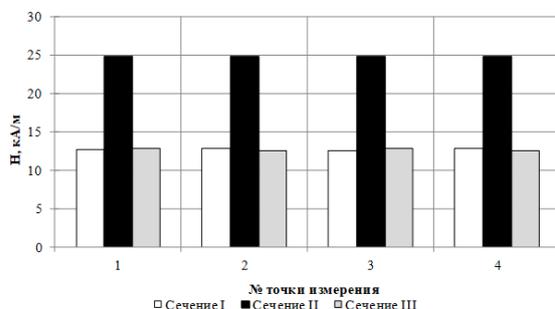


Рис. 9. Напряженность магнитного поля в различных сечениях соленоида

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

В таблице 3 представлены усредненные данные, полученные в результате измерений образцов с помощью разработанного коэрцитиметра и эталонные значения, полученные на установке БУ-3. В таблицу так же внесены расчетные значения относительной погрешности измерений, полученные с помощью ранее рассмотренной методики.

Таблица 3
Table 3

Результаты измерений коэрцитивной силы образцов
Results of coercive force measurements of samples

Форма пластины	Материал пластины	Значение коэрцитивной силы, кА/м				Относительная погрешность измерения разработанным прибором, %	
		БУ-3		Разработанный прибор		1 образец	2 образец
		1 образец	2 образец	1 образец	2 образец		
Параллелограмм	T15K6	17,56	17,8	17,01	18,3	5,2	4,7
	BK15	25,5	26,2	24,9	26,6	4,3	4,1
	BK8	20,6	20,3	19,8	21	5,4	5,2
Прямоугольная	T15K6	18,1	19,3	18,7	20,1	5,2	5,8
	BK15	30,4	32,6	31,1	33,1	4,7	5,5
	BK8	24,1	24,4	23,18	25,1	5,6	5,2
Сложная форма	T15K6	27,5	27,2	26,7	28,2	4,8	5,5
	BK15	47,5	49,8	48,2	50,2	4,7	5,6
	BK8	38,8	41,5	40,1	39,4	5,4	5,4

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Анализ результатов проведенных исследований, представленных в таблице 3

показывает, что относительная погрешность измерения разработанным коэрцитиметром для образцов из различных твердых сплавов и различной формы не превышает 6%. Изменение формы и марки материала не оказывает существенного влияния на результат контроля.

Результаты проведенных исследований показывают, что характеристики элементов измерительного блока рассчитаны, верно, о чем свидетельствует достаточно высокая равномерность напряженности магнитного поля в различных сечениях и точках соленоида. Расхождение исследуемого параметра не превышает 3%. Схемные и конструктивные решения, лежащие в основе опытного образца коэрцитиметра, позволяют осуществлять контроль режущих пластин и других изделий из твердого сплава, различной конфигурации. Фактическая погрешность измерения не превышает 6%, что соответствует требованиям современных стандартов к подобным приборам. Полученные результаты исследований могут быть использованы для проведения дальнейших исследований с целью совершенствования приборов неразрушающего контроля и практического освоения производством.

Литература

1. Максимов А. Б., Ерохина И.С. Неразрушающий контроль качества стальных изделий в машиностроении // Современные материалы, техника и технологии. 2021. №4. С. 30-35.
2. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S., et al. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015, vol.51, pp. 610-615. DOI:10.1134/S1061830915100095
3. Назарчук З. Т., Рыбачук В. Г., Учанин В. Н. Электромагнитная структуроскопия конструкционных материалов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2011. №1. С. 8-16.
4. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks // Materials & Design. 2020, vol. 196, pp. 109093. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109093.
5. Deepak J.R., Srikanth D., Surendran H., et al. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 44, pp. 3732-3737. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.578
6. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Mikhailov A.V., et al. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020, vol.56, pp. 574-580. doi: 10.1134/S1061830920070050
7. Hua T., Guo Z., Jing K. , et al. Residual stress evolution enhanced martensite phase transition and texture development in cryogenic-tempered WC-Co ultra-coarse grained cemented carbide // Materials Science and Engineering: A. 2022, vol.834, pp. 142592. doi: 10.1016/j.msea.2022.142592
8. Dive V., Lakade S. Recent Research Progress on Residual Stress Measurement Using Non-Destructive Testing // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 47, pp. 3282-3282. doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.094.
9. Tavares S.S.M., Pardal J.M., Noris L.F., et al. Microstructural characterization and non-destructive testing and of welded joints of duplex stainless steel in flexible pipes // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol.15, pp. 3399-3408. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.087
10. Sokolov R., Venedictov A., Novikov V., et al. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel // Materials Today: Proceedings. 2019, vol.11, pp. 169-174. doi: 10.1016/j.matpr.2018.12.126
11. Gogolinskii K. V., Syasko V. A. Actual metrological and legal issues of non-destructive testing // Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1379, pp. 012045. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
12. Saleem M., Hosoda A. Latin Hypercube Sensitivity Analysis and Non-destructive Test to Evaluate the Pull-out Strength of Steel Anchor Bolts Embedded in Concrete // Construction and Building Materials. 2021, vol.290, pp. 123256. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123256
13. Silva D.D.S., Raimundo R.A., Alves D.N.L., et al. Evaluation of mechanical ductile damage in sheet metal based on low-field magnetic analysis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021, vol. 539, pp. 168403. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168403
14. Tsybriy I., Koval N. Device for Non-destructive Testing Based on the ATmega328p

Microcontroller. // *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. - Cham: Springer, 2023. - Vol. 1. - P. 1579-1586.

15. Tsybriy I.K., Koval N.S., Topolskaya I. A. Coercimeter for non-destructive control of solid alloys // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2021. - Vol. 2131, Is. 5. - Article 052042.

16. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. №22(6). С.188-201. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201

17. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. №21(4). С. 123-133. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133

Авторы публикации

Цыбрий Ирина Константиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета.

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Коваль Николай Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета.

References

1. Maksimov AB, Erokhina IS. Non-destructive quality control of steel products in mechanical engineering. *Modern materials, equipment and technologies*. 2021;4:30-35.

2. Nichipuruk AP, Stashkov AN, Ogneva MS, et al. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51:610-615.

3. Nazarchuk ZT, Rybachuk VG, Uchanyn VN. Electromagnetic structuring of structural materials. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. 2011;1:8-16.

4. Kong IY, Bennett CJ, Hyde CJ. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. *Materials & Design*. 2020;196:109093.

5. Deepak JR, Srikanth D, Surendran H, et al. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44:3732-3737.

6. Kostin VN, Vasilenko ON, Mikhailov AV, et al. On the Advantages of Local Measurement of Coercive Force of Ferromagnetic Objects Based on Internal Field. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020;56:574-580.

7. Hua T, Guo Z, Jing K, et al. Residual stress evolution enhanced martensite phase transition and texture development in cryogenic-tempered WC-Co ultra-coarse grained cemented carbide. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;834:142592.

8. Dive V, Lakade S. Recent Research Progress on Residual Stress Measurement Using Non-Destructive Testing. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47:3282-3282.

9. Tavares SSM., Pardal JM, Noris LF, et al. Microstructural characterization and non-destructive testing and of welded joints of duplex stainless steel in flexible pipes. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:3399-3408.

10. Sokolov R, Venedictov A, Novikov V, et al. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel. *Materials Today: Proceedings*. 2019;11:169-174.

11. Gogolinskii KV, Syasko VA. Actual metrological and legal issues of non-destructive testing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1379:012045.

12. Saleem M, Hosoda A. Latin Hypercube Sensitivity Analysis and Non-destructive Test to Evaluate the Pull-out Strength of Steel Anchor Bolts Embedded in Concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;290:123256.

13. Silva DDS, Raimundo RA, Alves DNL, et al. Evaluation of mechanical ductile damage in sheet metal based on low-field magnetic analysis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;539:168403.

14. Tsybriy I, Koval N. Device for Non-destructive Testing Based on the ATmega328p Microcontroller. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022*. 2023;1:1579-1586.

15. Tsybriy IK, Koval NS, Topolskaya IA. Coercimeter for non-destructive control of solid alloys. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131(5):052042.

16. Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Methodology for conducting operational diagnostics of pipelines of energy systems and complexes. *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;22(6):188-201.

17. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, Krotov VI. The use of non-contact methods for diagnosing high electric fields. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;21(4):123-133.

Authors of the publication

Irina K. Tsybriy – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nikolai S. Koval – Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные шифры в рамках группы научной специальности:

Получено 05.04.2023 г.

Отредактировано 06.06.2023 г.

Принято 15.06.2023

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.1.003

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-3-24-40

ВЫЯВЛЕНИЕ ДОЛЕВОГО ВКЛАДА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИХ СТОИМОСТЬ

Малафеев А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы оценки стоимости услуг по передаче электроэнергии по электрическим сетям территориальных сетевых организаций (ТСО), в том числе крупных промышленных предприятий со статусом ТСО и собственной генерацией. Разработать методику расчета стоимости потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения таких предприятий с учетом технико-экономических характеристик источников. Разработать методику определения долевого вклада отдельных источников и потребителей в потери электроэнергии и их стоимость. Провести расчеты стоимости потерь электроэнергии и структуры вклада в нее источников питания промышленного предприятия-ТСО и сделать выводы. *МЕТОДЫ:* При решении поставленных задач использовались методы расчета установившихся режимов систем электроснабжения. *РЕЗУЛЬТАТЫ:* В статье описана актуальность темы, созданы расчетные методики, в условиях крупного промышленного энергоузла рассмотрена система оплаты субабонентами промышленного предприятия услуг по передаче электроэнергии и ее взаимосвязь с потокораспределением. Проанализирована структура вклада источников питания в потери электроэнергии системы электроснабжения. Сформулирован подход к корректировке индивидуального тарифа на покупку потерь электроэнергии с учетом размещения источников питания в системе электроснабжения. Даны рекомендации по снижению степени недокомпенсации стоимости услуг по передаче электроэнергии сторонними потребителями. Предложено использование для этих целей нормативов технологических потерь электроэнергии (НТПЭ), определенных по стоимости потерь. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* При существующей нормативно-правовой базе в интересах предприятия-ТСО распределять субабонентов в схеме таким образом, чтобы их фактический НТПЭ, определенный с учетом адресности потерь, не превышал расчетный НТПЭ. В этом случае не происходит переноса стоимости потерь с субабонентов на собственное потребление предприятия-ТСО. При этом субабоненты не несут дополнительных расходов, поскольку рассчитываются с гарантирующим поставщиком по котловому тарифу. НТПЭ для этих целей необходимо определять по стоимости потерь с учетом характеристик источников. Доля оплаты потерь в сетях предприятия-ТСО, которая идет на собственное потребление и не компенсируется субабонентами, при этом снижается. Следовательно, снижается величина затрат на электроэнергию и их доля в себестоимости готовой продукции предприятия-ТСО.

Ключевые слова: *потребитель-субабонент; собственная электростанция; долевого вклад; стоимость потерь электроэнергии; услуги по передаче; тариф на покупку потерь; необходимая валовая выручка.*

Для цитирования: Малафеев А.В. Выявление долевого вклада источников питания системы электроснабжения в потери электроэнергии и их стоимость // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 24-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-24-40.

IDENTIFICATION OF THE SHARING CONTRIBUTION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM POWER SOURCES TO THE ELECTRICITY LOSSES AND THEIR COST

AV. Malafeev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the problems of estimating the cost of services for the transmission of electricity through the electric networks of territorial grid organizations (TGOs), including large industrial enterprises with the status of TGOs and their own generation. Develop a methodology for calculating the cost of electricity losses in the elements of the power supply system of such enterprises, taking into account the technical and economic characteristics of the sources. Develop a methodology for determining the share contribution of individual sources and consumers to electricity losses and their cost. Calculate the cost of electricity losses and the structure of the contribution to it of power sources of an industrial TGO enterprise and draw conclusions. *METHODS.* When solving the tasks set, methods for calculating steady-state modes of power supply systems were used. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, created calculation methods, in the conditions of a large industrial power center, the system of payment by sub-subscribers of an industrial enterprise for services for the transmission of electricity and its relationship with the flow distribution is considered. The structure of the contribution of power sources to the losses of electricity in the power supply system is analyzed. An approach has been formulated to adjust the individual tariff for the purchase of electricity losses, taking into account the placement of power sources in the power supply system. Recommendations are given to reduce the degree of undercompensation of the cost of electricity transmission services by third-party consumers. It is proposed to use for these purposes the norms of technological losses of electricity (NTLE), determined by the cost of losses. *CONCLUSION.* Under the current regulatory framework, it is in the interests of TGO enterprises to distribute sub-subscribers in the scheme in such a way that their actual NTLE, determined taking into account the targeting of losses, does not exceed the calculated NTLE. In this case, there is no transfer of the cost of losses from sub-subscribers to the own consumption of the TGO enterprise. At the same time, sub-subscribers do not incur additional costs, since they pay off with the guaranteeing supplier at the boiler tariff. NTLE for these purposes must be determined by the cost of losses, taking into account the characteristics of the sources. The share of payment for losses in the networks of an TGO enterprise, which goes to its own consumption and is not compensated by sub-subscribers, is reduced. Consequently, the amount of costs for electricity and their share in the cost of finished products of the TGO enterprise is reduced.

Keywords: *consumer-sub-subscriber; own power plant; share contribution; the cost of electricity losses; transfer services; tariff for the purchase of losses; required gross proceeds.*

For citation: Zatsarinnaya YuN, Reutin GV, Kurilov S S, Isaeva OV, Kovalev GS Forecasting electricity generation from renewable energy using machine learning methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(3):24-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-24-40.

Введение (Introduction)

Расчёт и анализ потерь электроэнергии является одной из наиболее важных задач при управлении эксплуатационными режимами системы электроснабжения. Управление уровнем потерь электроэнергии в электрических сетях – сложная комплексная задача. В связи с развитием оптового рынка электроэнергии принято подразделять потери на технологические, коммерческие и небалансные. Наиболее полная классификация отчётных потерь с экономических позиций даётся Ю.С. Железко в [1]. Для определения потерь электроэнергии традиционно используются различные методы расчета, подробно описанные в литературе.

Для снижения фактического уровня потерь электрической энергии до их экономически обоснованного и документально подтвержденного технологического уровня осуществляется нормирование потерь. Норматив потерь электрической энергии включается в тариф на передачу электрической энергии по электрическим сетям и,

следовательно, оплачивается сторонними потребителями электрической энергии, подключенными к электрической сети рассматриваемого потребителя. Для правильной оценки стоимости услуг по передаче необходимо знать расчетный вклад каждого потребителя в суммарные потери электроэнергии, который определяется в настоящее время по инструкции Минэнерго¹, исходя только лишь из уровня напряжения, на котором присоединен тот или иной потребитель. Кроме того, одним из важнейших экономических показателей системы электроснабжения является стоимость потерь электроэнергии. Стоимость дополнительных потерь электроэнергии в сетях крупного градообразующего предприятия компенсируется за счет включения стоимости услуг по ее передаче в тарифы для сторонних потребителей предприятия. При неполной компенсации стоимости потерь сторонними потребителями разницу вынуждено оплачивать предприятие, это увеличивает себестоимость его продукции. В настоящее время большинство предприятий имеют в своем составе собственные электростанции, а также покупают электроэнергию у различных энергоснабжающих организаций. Стоимость покупной электроэнергии и себестоимость электроэнергии, выработанной на собственных электростанциях, различна. Это значительно усложняет процедуру расчета с потребителями. Для правильной оценки стоимости услуг по передаче электроэнергии необходима разработка методики оценки доли каждого источника электроэнергии и каждого потребителя в потерях активной мощности и в стоимости потерь.

Литературный обзор (Literature Review)

В работе [2] развивается идея построения интегрированных транзактивных энергетических систем – структур, в числе прочего объединяющих свойства оптовых и локальных рынков электроэнергии. Ставится задача взаимодействия различных субъектов – микросетей, агрегаторов, производителей и как дальнейшее направление – учет сетевых затрат и сетевых ограничений при формировании равновесной цены. Вопросам ценообразования в реальном времени для домохозяйств в распределительных сетях с интеллектуальными средствами учета электроэнергии посвящена статья [3]. Предлагается строить прямые отношения между распределительными сетями и бытовыми потребителями. При этом основная решаемая задача – минимизация затрат операторов распределительных сетей на покупку электроэнергии у магистральных сетевых компаний и распределенной генерации с учетом ценовой эластичности спроса потребителей. Методика определения узловых цен рассмотрена в статье [4], задача рассмотрена как оптимизационная с решением ее методом неопределенных множителей Лагранжа. Взаимосвязь режима энергосистемы и узловых цен рассмотрена в работах [5,6]. Влияние электрических сетей на цены часто рассматривается только с позиций учета пропускной способности (например, работа [7], в которой рассматривается взаимодействие локальных рынков электроэнергии, или [8], посвященная стратегии коммерческой и технологической диспетчеризации активной распределительной сети). Таким же образом в [9] учитывается функционирование электрических сетей при взаимодействии поставщика розничного рынка электроэнергии и агрегатора спроса. В основе определения равновесной цены – максимизация целевой функции благосостояния участников рынка, представляющей собой разность заявленных объемов выработки и потребления в стоимостном выражении. Предлагаемый вид функции Лагранжа содержит несколько типов неопределенных множителей, вводимых только для активных ограничений. При этом суммарные потери в электрических сетях входят в балансовое ограничение. В работе [10] предлагается при определении маржинальной равновесной цены учитывать не суммарные (концентрированные), а так называемые распределенные потери, отнесенные к каждому производителю в качестве дополнительной нагрузки, для чего использован начальный генетический алгоритм; при этом вводится понятие коэффициента предельных поставок, пропорционального относительному приросту суммарных потерь для соответствующего генерирующего источника.

В статье [11] рассмотрена разработанная авторами балансовая модель распределения потерь, учитывающая место потребителей в электрической сети, а также методика формирования поправок к тарифам на услуги по передаче электроэнергии, стимулирующих потребителей снижать потери. Вопросам повышения достоверности прогнозирования нагрузок промышленных потребителей при более точном учете потерь посвящена работа [12]. В статье [13] рассматривается рациональное размещение

¹ Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Введ. приказом Минэнерго РФ №326 от 30.12.2008.

теплоэлектроцентралей городского хозяйства на основе их характеристик, но, в первую очередь, с позиций эффективности теплоснабжения. Методика учета режима электрических сетей при выборе размещения распределенных источников предлагается в [14]. В работе [15] анализируются сложности оценки деятельности электросетевых предприятий, связанных с использованием котлового принципа формирования тарифа на передачу электроэнергии. Предлагается показатель оценки эффективности, учитывающий, наряду с передаваемой потребителям мощностью, расстояние передачи (ставящий, однако, потребителей в неравное положение). Методика распределения стоимости услуг по передаче электроэнергии с учетом загрузки элементов сети, участвующих в обеспечении электроэнергией того или иного узла нагрузки, рассмотрена в [16]. Этими же авторами в работе [17] рассмотрены вопросы совершенствования тарифов на технологическое присоединение на основе относительных приростов потерь мощности. Разработанная методика, кроме основной цели, позволяет снизить удельную себестоимость передачи электроэнергии. Специфическим вопросам адресности электропотребления подвижного состава железных дорог посвящена статья [18], разделение потерь мощности по элементам тяговой сети здесь предлагается выполнять пропорционально доле полной мощности поезда в суммарном потреблении от тяговой подстанции.

Определение стоимости потерь электроэнергии с учетом технико-экономических характеристик источников

В качестве исходных данных используются результаты расчета установившегося режима, на основе которых определяются затраты на передачу электроэнергии для каждого элемента схемы сети, после чего эти величины суммируются. Дополнительными данными для расчета величины стоимости потерь является величина стоимости электроэнергии для ее источников. В этом качестве могут использоваться:

- для узлов примыкания к сетям сетевой компании – цена, установленная для данного потребителя на розничном рынке с учетом его ценовой категории, присоединенной мощности и других факторов, либо цена, установленная в результате торгов на РСВ. Поскольку промышленное предприятие с собственными электростанциями является активным потребителем с регулируемой нагрузкой², то цена на электроэнергию для него может устанавливаться на БР;
- для собственных электростанций предприятия – на основе их технико-экономических характеристик.

Функция определения стоимости вызывается для всех элементов, кроме источников электроэнергии и выключателей. Пример схемы замещения, используемой для расчетов, показан на рисунке 1. Обозначения параметров режима в точках связи между элементами даны для случая, когда текущим является «Элемент 1». Для связи текущего элемента определяется ток связи (на рис. 1 – токи \dot{I}_{14} , \dot{I}_{13} , \dot{I}_{12}):

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_{\text{вн}i} - \dot{U}_j K_{\text{тр}ij}) \dot{Y}_{ij}, \quad (1)$$

где i – текущий элемент схемы; j – связь текущего элемента с другим элементом; напряжения в точках связей элемента i с элементом j \dot{U}_j – на рисунке 1, \dot{U}_2 , \dot{U}_3 , \dot{U}_4 ; $\dot{U}_{\text{вн}i}$ – фиктивное напряжение в средней точке схемы замещения элемента – на рисунке 1. $\dot{U}_{\text{вн}1}$, $\dot{U}_{\text{вн}2}$, $\dot{U}_{\text{вн}3}$; параметры ветви схемы замещения элемента i в сторону элемента j – $K_{\text{тр}ij}$ и \dot{Y}_{ij} – соответственно $K_{\text{тр}12}$, $K_{\text{тр}13}$, $K_{\text{тр}14}$ и \dot{Y}_{12} , \dot{Y}_{13} , \dot{Y}_{14} .

При этом определяется знак величины. Если ток направлен по связи к текущему элементу, то определяется комплексный поток мощности по этой связи. Затем потоки мощности для всех элементов схемы суммируются.

$$\dot{S}_{ij} = \dot{U}_j \hat{I}_{ij}; \quad (2)$$

$$\dot{S}_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^K \dot{S}_{ij}. \quad (3)$$

где i – текущий элемент схемы;

j – связь текущего элемента с другим элементом;

² Основные положения функционирования розничных рынков электрической энергии (утв. Постановлением Правительства РФ от 4 мая 2012 г. №442; с изм. и доп. 28.12.2012–30.04.2020). URL: <http://base.garant.ru/70183216/>

K – количество учитываемых связей.

Стоимость для текущего элемента схемы определяется по активной составляющей потока мощности с помощью рекурсивной функции пропорционально потокам P_{ij} от каждого предыдущего элемента, с которым у текущего элемента есть связь:

$$C_{\Sigma i} = \frac{\sum_{j=1}^K P_{ij} C_{ij}}{P_{\Sigma i}}, \quad (4)$$

здесь C_{ij} – стоимость потерь электроэнергии для связи j элемента i .

Затем стоимости для каждого потребителя M суммируются

$$C_{M\Sigma} = \sum_{i=1}^N C_{M\Sigma i} \Delta P_{Mi}, \quad (5)$$

где N – количество элементов.

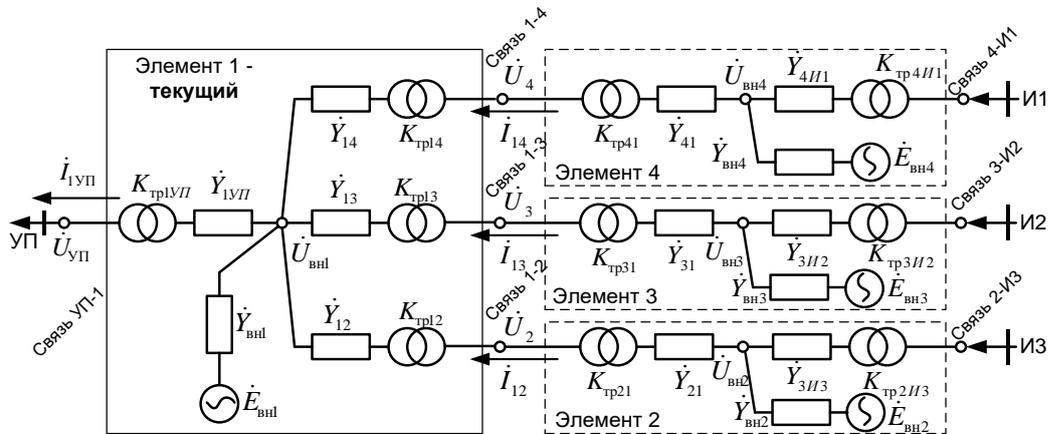


Рис. 1. Схема замещения участка сети

Fig. 1. Network site replacement scheme

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчет стоимости повторяется для следующего элемента сети, источником для которого является только что пройденный элемент. Расчет ведется для каждого из несвязанных участков сети и может начинаться с любого из элементов-источников электроэнергии. За источник электроэнергии для начала расчета берется синхронный генератор или узел связи с энергосистемой. Общая стоимость потерь электроэнергии определяется суммированием стоимостей потерь по каждому элементу.

Вклад источников питания системы электроснабжения промышленного предприятия в потоки активной мощности, потери активной мощности и их стоимость по элементам сети

В системе электроснабжения крупного промышленного предприятия действует, как правило, несколько источников электроэнергии, к которым могут относиться:

1) точки (группы точек, ГТП) поставки электроэнергии с ОРЭМ (только для крупных потребителей – участников оптового рынка); цены и объемы поставки чаще всего определяются по результатам торговой сессии на рынке «на сутки вперед», РСВ, затем цены корректируются по фактическим параметрам режима в процессе торгов на балансирующем рынке (БР). Потребители с собственными электростанциями, являющиеся активными промышленными потребителями (АПП) в связи с возможностью регулирования нагрузки за счет управления местной генерацией, участвуют в ценообразовании не только на РСВ, но и на БР, подавая и на том, и на другом рынке ценовые заявки. Каждая ГТП может характеризоваться своей узловой ценой, учитывающей сетевые ограничения. Коммерческий интервал, используемый в настоящее время, – 1 час;

2) ГТП электроэнергии с розничных рынков электроэнергии (РРЭ), как от гарантирующих поставщиков (ГП), так и от независимых сбытовых компаний (НСК) или сетевых организаций, имеющих право продажи электроэнергии на розничном рынке

(СОПР). В данном случае объем и стоимость определяются двусторонними договорами, фактический объем зависит от реальных режимных параметров, стоимость же зависит от цены на ОРЭМ для субъекта РРЭ с учетом сбытовой надбавки (для ГП устанавливается регламентами РРЭ) и тарифов на услуги по передаче электроэнергии, а также по оперативно-диспетчерскому управлению. Коммерческий интервал на РРЭ – 1 месяц;

3) собственные источники электроэнергии (СИЭ), которыми чаще всего являются теплофикационные (ТЭЦ), газотурбинные, парогазовые и газопоршневые электростанции; ТЭЦ позволяют эффективно утилизировать вторичные энергоресурсы, что определило одно из основных их назначений на предприятиях черной металлургии. На последних основными видами вторичных энергоресурсов являются доменный и коксовый газы; при их использовании на ТЭЦ осуществляется сжигание топливных смесей с различным соотношением видов топлива, зависящим от текущей нагрузки электростанций и их отдельных агрегатов. В таких случаях стоимость выдаваемой электроэнергии будет определяться текущим режимом.

В сетях промышленного предприятия со сложнотоположенными участками с выдачей мощности СИЭ на различных ступенях напряжения и поставкой электроэнергии от нескольких энергоснабжающих организаций стоимость потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения определяется вкладом каждого из источников в потокораспределение с учетом их экономических характеристик. На практике для оценки стоимости потерь чаще всего рассчитывается средневзвешенная цена, учитывающая только лишь долю в вырабатываемой электроэнергии каждого из источников. Это приводит к некорректной оценке стоимости услуг по передаче электроэнергии сторонним потребителям.

Знание вклада каждого из источников необходимо для анализа структуры стоимости потерь, а также для рассмотрения заявок на технологическое присоединение к сетям предприятия.

Крупные градообразующие предприятия нередко наряду с городскими электрическими сетями, производственными отделениями филиалов МРСК и пр. выполняют функции сетевых компаний (например, ПАО «ММК» входит в реестр зарегистрированных территориальных сетевых организаций Челябинской области). В этом случае, кроме структурных подразделений промышленного предприятия, от его электрических сетей питаются разнородные сторонние потребители, различающиеся как по величине, так и по составу нагрузки. Их электроснабжение осуществляется на различных уровнях напряжения, от 6 кВ до 110 кВ.

В роли таких потребителей могут выступать субъекты розничного рынка – либо потребители, либо сетевые компании. Это могут быть другие собственники промышленных, торговых, сервисных и т.п. объектов (от индивидуальных предпринимателей и мелких ООО до предприятий, сопоставимых по присоединенной мощности с предприятием – собственником электрических сетей (ПСЭС)), городские электросети и другие сетевые компании; подрядные организации, имеющие производственные участки на территории предприятия. В результате того, что многие предприятия избавляются от «непрофильных» активов с выводом их в дочерние структуры, довольно крупные объекты сторонних потребителей могут находиться на территории ПСЭС; точки присоединения таких потребителей могут быть разбросаны практически по всем его сетям 6–10 кВ (иногда и 0,4 кВ).

В связи с этим актуальным является корректное определение вклада каждого из потребителей в потокораспределение и суммарные потери мощности, что необходимо для расчета тарифа на услуги по передаче электроэнергии.

Предлагается следующий способ расчета коэффициентов долевого вклада источника (КДВи) в поток мощности $F_{им}$ и в потери мощности $F_{ип}$. На рисунке 2 показан участок электрической сети с тремя генерирующими узлами (1, 2, 3) и тремя нагрузочными узлами (4, 5, 6).

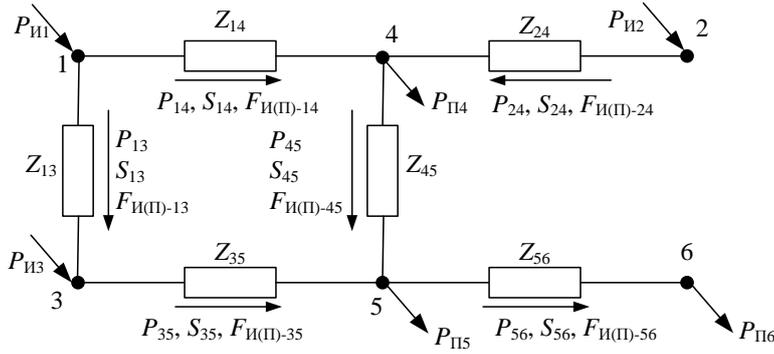


Рис. 2. Участок электрической сети с тремя источниками питания Fig. 2. Electrical grid with three power sources

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для источника И1:

– вклад в поток мощности и потери на участке 1–4 (или для узла 1):

$$F_{ИМ1-14} = \frac{P_{И1}}{P_{И1}} = 1; \quad F_{ИП1-14} = \frac{S_{И1}^2}{S_{И1}^2} = 1;$$

вклады от других источников на этом же участке равны нулю, как следует из приведенного на рис. 2 потокораспределения:

$$F_{ИМ2-14} = F_{ИМ3-14} = 0; \quad F_{ИП2-14} = F_{ИП3-14} = 0;$$

– для участка 2–4 (для узла 2):

$$F_{ИМ1-24} = F_{ИП1-24} = 0; \quad F_{ИМ2-24} = F_{ИП2-24} = 1;$$

– для участка 4–5 (для узла 4):

$$F_{ИМ1-45} = \frac{P_{14}}{P_{14} + P_{24}}; \quad F_{ИП1-45} = \frac{S_{14}^2}{S_{14}^2 + S_{24}^2};$$

$$F_{ИМ2-45} = \frac{P_{24}}{P_{14} + P_{24}}; \quad F_{ИП2-45} = \frac{S_{24}^2}{S_{14}^2 + S_{24}^2};$$

– для участка 3–5 (для узла 3):

$$F_{ИМ1-35} = \frac{F_{ИМ1-13}P_{13} + F_{ИМ1-ИМ3}P_{ИМ3}}{P_{13} + P_{ИМ3}} = \frac{F_{ИМ1-13}P_{13}}{P_{13} + P_{ИМ3}},$$

т.к. вклад источника И1 в поток источника И3 отсутствует; при этом

$$F_{ИП1-35} = \frac{F_{ИП1-13}S_{13}^2 + F_{ИП1-ИП3}S_{ИП3}^2}{S_{13}^2 + S_{ИП3}^2} = \frac{F_{ИП1-13}S_{13}^2}{S_{13}^2 + S_{ИП3}^2};$$

– для участка 5–6 (для узла 5):

$$F_{ИМ1-56} = \frac{F_{ИМ1-35}P_{35} + F_{ИМ1-45}P_{45}}{P_{35} + P_{45}}; \quad F_{ИП1-56} = \frac{F_{ИП1-35}S_{35}^2 + F_{ИП1-45}S_{45}^2}{S_{35}^2 + S_{45}^2};$$

В общем виде получаем:

$$F_{ИМi-k} = \frac{F_{ИМi-jk} P_{jk} + F_{ИМi-(j+1)k} P_{(j+1)k} + \dots + F_{ИМi-(n-1)k} P_{(n-1)k} + F_{ИМi-nk} P_{nk}}{P_{jk} + P_{(j+1)k} + \dots + P_{(n-1)k} + P_{nk}}, \quad (6)$$

$$F_{ИПi-k} = \frac{F_{ИПi-jk} S_{jk}^2 + F_{ИПi-(j+1)k} S_{(j+1)k}^2 + \dots + F_{ИПi-(n-1)k} S_{(n-1)k}^2 + F_{ИПi-nk} S_{nk}^2}{S_{jk}^2 + S_{(j+1)k}^2 + \dots + S_{(n-1)k}^2 + S_{nk}^2}, \quad (7)$$

где i – номер источника;

$j, j+1, j+2, \dots, n-1, n$ – номера ветвей, входящих в узел, для которого определяется КДВи;

k – номер узла, для которого определяется КДВи.

Во всех полученных формулах в знаменателе находится сумма потоков мощности по ветвям, имеющих положительное направление (в узел). Полученный коэффициент долевого вклада справедлив для всех ветвей, потоки по которым имеют отрицательное направление (выходят из узла). Числитель для какого-либо определенного узла (или выходящих из него ветвей, что равносильно) может быть определен только тогда, когда найдены КДВи по всем входящим ветвям, т.е. выполнен полный обход схемы от рассматриваемого источника. Программно это реализуется в виде рекуррентной функции *DetectShareSource*, вычисляющей КДВи для одного выбранного источника, и отмечающей пройденную ветвь установкой флага (*IsCalcFS*). На рисунках 3–5 показаны результаты работы функции при обходе схемы от источников И1, И2, И3 соответственно.

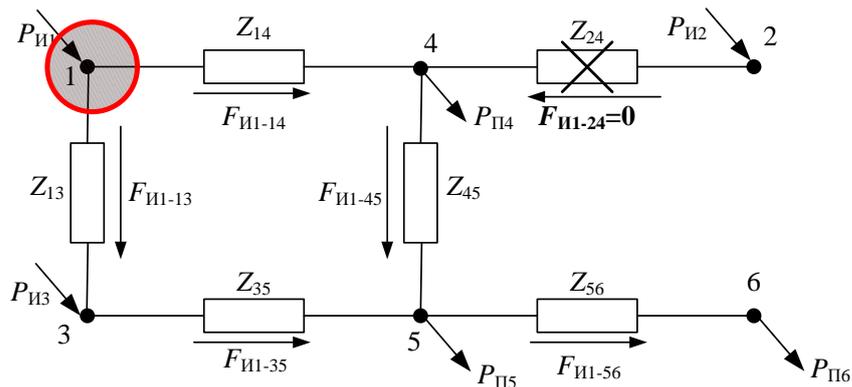


Рис. 3. Результат обхода схемы от источника И1 *Fig. 3. Result of circuit bypass from source E1*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

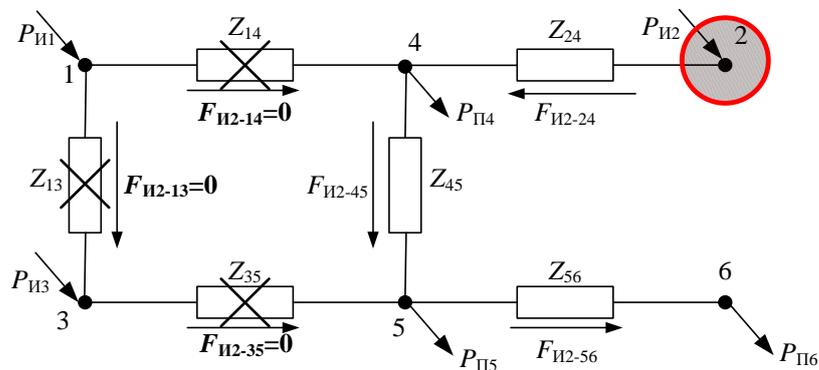


Рис. 4. Результат обхода схемы от источника И2 *Fig. 4. Result of circuit bypass from source E2*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

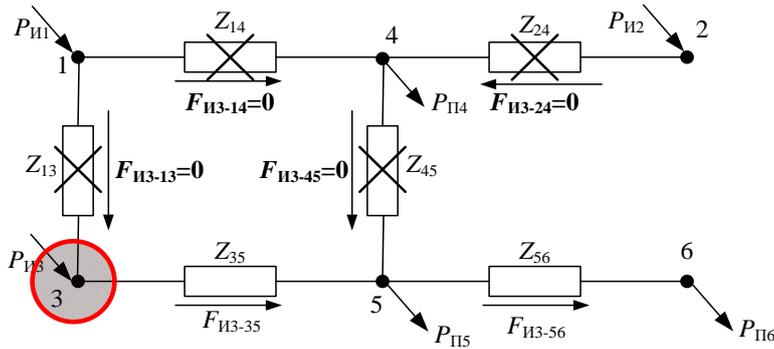


Рис. 5. Результат обхода схемы от источника И3 Fig. 5. Result of circuit bypass from source E3 И3

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Полученные рассмотренным способом КДВи могут быть использованы для определения доли какого-либо источника i в суммарных потерях мощности:

$$\Delta P_{ИPi} = \sum_{m=1}^M F_{ИPi-mk} \Delta P_m, \quad (8)$$

где ΔP_m – потери мощности в ветви m ;

k – узел, в который входит ветвь m ;

M – общее количество ветвей в схеме.

а также для определения доли источника в суммарном потоке мощности, втекающем в некоторый узел k :

$$P_{ИMi-k} = \sum_{j=1}^n F_{ИMi-jk} P_{j-k}, \quad (9)$$

где P_{j-k} – поток мощности, втекающий в узел k по ветви j ;

n – количество ветвей, входящих в узел k .

В стоимости $C_{\Sigma i}$ (см. (4); рассчитанной, например, для элемента «сборные шины») значения (9) позволяют определить долю каждого источника:

$$C_{ИMi-k} = C_{\Sigma i} \frac{P_{ИMi-k}}{\sum_{j=1}^n P_{j-k}}. \quad (10)$$

Рассмотрим применение изложенного подхода на примере крупного металлургического предприятия, имеющего в своем составе три собственных электростанции с различными технико-экономическими характеристиками и себестоимостью электроэнергии. Упрощенная схема такого промышленного энергоузла приведена на рисунке 6.

В схеме имеют место поставки на предприятие электроэнергии с розничного рынка РРЭ (из сетей региональной энергосистемы и от электростанции розничного рынка ГПЭС) по цене, установленной в договоре, а также от собственных электростанций – по их себестоимости; у каждой электростанции себестоимость электроэнергии различна и определяется характеристиками оборудования и применяемого топлива. Электроснабжение потребителей осуществляется на напряжениях 6, 10, 35, 110 кВ. Наряду с цехами крупного предприятия получают питание сторонние потребители – более мелкие предприятия, городская коммунально-бытовая нагрузка, близлежащие сельские районы.

Ввиду наличия сторонних потребителей и транзита мощности в сети региональных сетевых компаний предприятие имеет статус территориальной сетевой организации (ТСО) и оказывает услуги по передаче электроэнергии и по технологическому присоединению к электрическим сетям. Точки присоединения потребителей на схеме показаны следующим образом: например, ТТП-ЦЭС-110 – точка технологического присоединения потребителей к шинам ЦЭС на напряжении 110 кВ. Тонкими линиями показаны связи внутри системы электроснабжения предприятия на

напряжениях 110-220 кВ. Они участвуют в передаче потребителям электроэнергии как от внешних источников питания, так и от собственных электростанций. Степень участия каждой связи в этом процессе определяется потокораспределением в конкретном режиме. Утолщенными линиями показаны связи, по которым осуществляются поставки электроэнергии извне.

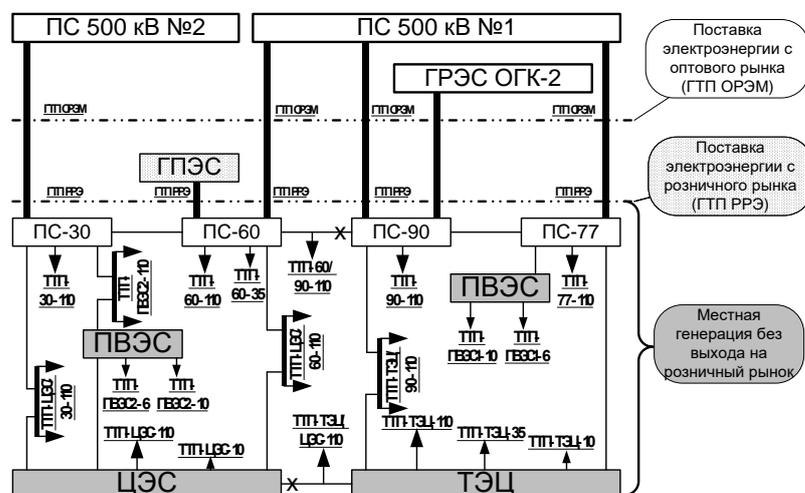


Рис. 6. Упрощенная схема промышленного энергоузла *Fig. 6. Simplified layout of industrial power plant energy node*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Сторонние потребители, подключенные к сетям предприятия, оплачивают услуги по передаче электроэнергии по котловому тарифу (рис. 7), устанавливаемому региональной службой по тарифам (министерство тарифного регулирования и энергетики, департамент тарифного регулирования и т.д. в зависимости от региона), гарантирующему поставщику, который передает эти средства сетевой организации – котлодержателю (чаще всего МРСК). При этом предприятие-ТСО осуществляет покупку потерь на РРЭ у того же гарантирующего поставщика по индивидуально устанавливаемой цене; компенсация этой суммы производится со стороны котлодержателя также по индивидуальному договору на основе необходимой валовой выручки. Котловый тариф на услуги по передаче электроэнергии дифференцируется только по уровням напряжения, на которых подключены потребители (ВН – 110 кВ и выше, СН-I – 35 кВ, СН-II – 3–10 кВ, НН – ниже 1 кВ)³. При этом не учитывается электрическая удаленность ТПП от собственного источника или точки поставки с розничного рынка. В Инструкции Минэнерго⁴ указывается, что расчет нормативов технологических потерь электроэнергии (НТПЭ) для формирования тарифов на передачу должен вестись для выделенного участка сети, участвующего в электроснабжении субабонентов, с учетом собственной нагрузки предприятия. Отнесение потерь на того или иного потребителя в этом документе предполагается осуществлять пропорционально объемам переданной электроэнергии. В сложносвязанной сети с несколькими источниками питания с разной стоимостью электроэнергии (рис. 6) в этом случае необходимо для каждой ТПП вычислять узловую стоимость потерь с учетом вклада каждого из источников.

Тариф на услуги по передаче электроэнергии устанавливается в двух формах: как двухставочный тариф, включающий в себя ставку на содержание электрических сетей и ставку на оплату нормативных потерь электроэнергии; как одноставочный тариф со ставкой на оплату нормативных потерь. Применяемый вариант тарифа выбирается потребителем. Вклад источника питания в узловую стоимость потерь определяет именно ставку на оплату нормативных потерь.

³ Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 г. №1178 (ред. от 08.12.2018 г.) «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике» (вместе с «Основными принципами ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике», «Правилами государственного регулирования (пересмотра, применения) цен (тарифов) в электроэнергетике»).

⁴ Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям (утв. приказом Минэнерго РФ от 30 декабря 2008 г. №326).

большую узловую цену.

Экономическая целесообразность подключения потребителя к той или иной ТТП (в рамках одного класса напряжения) зависит от способа расчета индивидуального тарифа на покупку потерь электроэнергии у гарантирующего поставщика. По сложившейся практике тариф покупки потерь $T_{\text{ПОТ}}$ у единственного гарантирующего поставщика для промышленного предприятия–ТСО, имеющего собственные электростанции, рассчитывается аналогично ТСО, покупающей потери у нескольких гарантирующих поставщиков (см. Приказ Федеральной службы по тарифам №20-э/2⁵), в виде средневзвешенной величины:

$$T_{\text{ПОТ}} = \frac{T_{\text{ГП}} W_{\text{ГП}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{ЭС}i} W_{\text{ЭС}i}}{W_{\text{ОС}}} + T_{\text{усл.ГП}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{ГП}}$ – ставка оплаты единицы электроэнергии от гарантирующего поставщика;
 $W_{\text{ГП}}$ – отпуск в сети предприятия–ТСО от ГП;
 $T_{\text{усл.ГП}}$ – ставка, включающая сбытовую надбавку и услуги ГП;
 $C_{\text{ЭС}i}$ – себестоимость электроэнергии i -й собственной электростанции;
 $W_{\text{ЭС}i}$ – отпуск в сети предприятия–ТСО от i -й собственной электростанции;
 n – число собственных электростанций;
 $W_{\text{ОС}}$ – суммарный отпуск в сети предприятия–ТСО:

$$W_{\text{ОС}} = W_{\text{ГП}} + \sum_{i=1}^n W_{\text{ЭС}i}.$$

При этом имеет место допущение, что долевой вклад i -й электростанции (или ГП) в потери электроэнергии равен долевному вкладу в суммарный отпуск в сеть. В действительности он зависит от расположения точек выдачи мощности электростанций и групп точек поставки электроэнергии с розничного рынка по отношению к точкам присоединения потребителей, а также от потокораспределения в сложном замкнутой сети. Расчет по формулам (6)–(10) позволит определить более обоснованное значение $T_{\text{ПОТ}}$.

Если ГТП, точки выдачи мощности электростанций и ТТП субабонентов равномерно (с учетом выдаваемой и потребляемой мощности) распределены по сети, $T_{\text{ПОТ}}$ примерно будет соответствовать величине, полученной по (11). Такая же картина будет наблюдаться, если источники и субабоненты сконцентрированы в одном районе системы электроснабжения, – при этом уменьшается количество элементов схемы, участвующих в передаче электроэнергии субабонентам, и общий объем покупки потерь. В случае, если ГТП и электростанции максимально удалены от всех субабонентов, причем взаимная удаленность отдельных ГТП и электростанций мала, объем покупки потерь будет наибольшим, значительная часть элементов схемы будет участвовать в передаче электроэнергии субабонентам, однако долевой вклад каждого из источников будет практически такой же, как и при концентрированном расположении всех объектов. Во всех других случаях требуется оценка долевого вклада каждого из источников в суммарные потери по (6)–(10) и уточнение формулы (11) введением весовых коэффициентов $K_{\text{ГП}}$ и $K_{\text{ЭС}i}$:

$$T_{\text{ПОТ}} = \frac{T_{\text{ГП}} K_{\text{ГП}} W_{\text{ГП}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{ЭС}i} K_{\text{ЭС}i} W_{\text{ЭС}i}}{W_{\text{ОС}}} + T_{\text{усл.ГП}}, \quad (12)$$

где

$$K_{\text{ГП}} + \sum_{i=1}^n K_{\text{ЭС}i} = 1 + n. \quad (13)$$

Расчеты, проведенные для сетей 110 кВ объекта исследования, показали следующее соотношение (рис. 8).

⁵ Приказ Федеральной службы по тарифам от 6 августа 2004 г. №20-э/2 «Об утверждении методических указаний по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке» (в ред. от 29 марта 2018 г.).

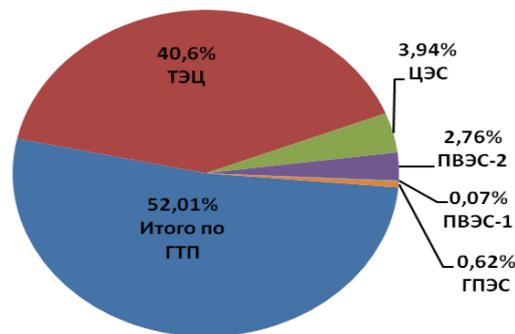


Рис. 8. Вклад источников питания в потери мощности *Fig. 8. Contribution of power sources to power losses*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Как видно из рис. 8, вклад ТЭС в потери оказывается практически в десять раз больше, чем для ЦЭС, хотя выдаваемая мощность ее превышает аналогичный показатель ЦЭС примерно на 30%, что объясняется незначительной выдачей ЦЭС на 110 кВ по сравнению с 10 кВ. Так же объясняется и незначительный вклад ПВЭС-2 (выдача в основном в сети 6 кВ и 10 кВ). В целом потери в сетях 110 кВ обусловлены, в первую очередь, поставками мощности с РРЭ и отпуском с шин высшего напряжения ТЭС. При этом ТЭС выдает мощность только в Южное кольцо, связь с Северным кольцом в нормальном режиме отсутствует. Коэффициенты по (13) будут равны (при $1+n=6$): для ТЭС $40,6\% \times 6/100=2,436$; для ГТП розничного рынка $52,01\% \times 6/100=3,1206$; для ЦЭС $3,94\% \times 6/100=0,2364$; для ПВЭС-2 $2,76\% \times 6/100=0,1656$; для ГПЭС $0,62\% \times 6/100=0,0372$; для ПВЭС-1 $0,07\% \times 6/100=0,0042$. В сумме $2,436+3,1206+0,2364+0,1656+0,0372+0,0042=6=1+n$. В данном случае введение коэффициентов (13) увеличивает долю ТЭС и ГТП в $T_{\text{пот}}$.

Необходимая валовая выручка в части оплаты технологического расхода (потерь) электрической энергии (при использовании метода долгосрочной индексации НВВ⁶) определяется на основе тарифа покупки потерь электроэнергии в сетях $T_{\text{пот}}$ и объема потерь в сетях ТСО ΔW_{ϕ} :

$$\text{НВВ}^{\text{пот}} = T_{\text{пот}} \Delta W_{\phi} \quad (14)$$

Эффективность компенсации стоимости потерь субабонентами ТСО определяется разностью (15), которая при полной компенсации должна быть равна нулю:

$$\text{ЭК}_{\text{СБ}} = T_{\text{пот}} \Delta W_{\phi} - T_{\text{котл}} \sum_{k=1}^m \left(\frac{\text{НТПЭ}_k \%}{100} W_{\text{СБ}k} \right). \quad (15)$$

Технологические потери электроэнергии в сетях ТСО, обусловленные нагрузкой субабонента (согласно Приказу №32 Минэнерго):

$$\Delta W_{\text{ТПЭ.СБ.Р}} = \Delta W_{\text{ТПЭ.С.Р}} \frac{W_{\text{П.СБ.Р}}}{W_{\text{П.СБ.Р}} + W_{\text{П.СП.Р}}}, \quad (16)$$

где $W_{\text{П.СБ.Р}}$ – объем электроэнергии, передаваемый субабоненту;

$W_{\text{П.СП.Р}}$ – объем электроэнергии, передаваемый предприятием-ТСО собственным потребителям;

$W_{\text{ТПЭ.С.Р}}$ – полные потери электроэнергии в сетях предприятия-ТСО.

Норматив технологических потерь электроэнергии для субабонента, %, равен (также Приказ №32 Минэнерго, величина вклада субабонента при этом считается равной его вкладу в отпуск в сеть):

$$\text{НТПЭ} \% = \frac{\Delta W_{\text{ТПЭ.СБ.Р}}}{W_{\text{ОС.СБ.Р}}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

⁶ Приказ ФСТ России от 17.02.2012 №98-э (ред. от 24.08.2017) «Об утверждении Методических указаний по расчету тарифов на услуги по передаче электрической энергии, устанавливаемых с применением метода долгосрочной индексации необходимой валовой выручки» (Зарег. в Минюсте России 29.02.2012 №23367).

здесь отпуск в сеть определяется как

$$W_{OC.CB.P} = W_{П.CB.P} + \Delta W_{ПЭ.CB.P} \cdot \quad (18)$$

Отсюда при $ЭК_{CB}=0$ (15) получаем соотношение между $T_{ПОТ}$ и $T_{КОТЛ}$, соответствующее полной компенсации со стороны субабонентов при заданных величинах НТПЭ_k%:

$$T_{ПОТ} = \frac{T_{КОТЛ}}{\Delta W_{\Phi}} \sum_{k=1}^m \left(\frac{НТПЭ_k \%}{100} W_{CBk} \right). \quad (19)$$

Соотношение (19) может быть использовано при заключении договора с гарантирующим поставщиком (при наличии такой возможности) для определения индивидуального тарифа покупки потерь электроэнергии на розничном рынке.

Величина индивидуального тарифа для взаиморасчетов между котлодержателем и предприятием-ТСО при тех же условиях (Приказ ФСТ №20-э/2):

$$T_{инд.ТСО} = \frac{НВВ^{ПОТ}}{\sum_{k=1}^m W_{CBk}} = \frac{T_{ПОТ} \Delta W_{\Phi}}{\sum_{k=1}^m W_{CBk}}. \quad (20)$$

Выражение (20) может быть использовано при заключении договора с региональной сетевой компанией-котлодержателем для определения условий взаиморасчетов в целях компенсации необходимой валовой выручки $НВВ^{ПОТ}$ для оплаты потерь электроэнергии.

Вместе с тем важно следующее. Выражение (16) не учитывает место субабонента в схеме предприятия-ТСО. Предположим, что реальный вклад субабонента (с учетом его места в схеме) в потери больше, чем получается по (16), т.е. его НТПЭ расчетный меньше НТПЭ реального. Следовательно, у других субабонентов или собственных потребителей – больше, и они вынуждены компенсировать потери, обусловленные этим субабонентом. Особенно важно, если потери этих субабонентов перекладываются на собственных потребителей предприятия-ТСО (входят в долю ТПЭ на собственное потребление, которое оплачивается предприятием-ТСО уже не по тарифу на покупку потерь, а по нерегулируемым розничным ценам в соответствии с ценовой категорией предприятия).

Таким образом, при существующей нормативно-правовой базе в интересах предприятиях-ТСО распределять субабонентов в схеме таким образом, чтобы их фактический НТПЭ, определенный с учетом адресности потерь, был равен (или не меньше) расчетному НТПЭ. В этом случае не происходит переноса стоимости потерь с субабонентов на собственное потребление предприятия-ТСО. При этом субабоненты рассчитываются с гарантирующим поставщиком в любом случае по котловому тарифу, а следовательно, при одном и том же уровне напряжения в точке присоединения субабоненты не несут дополнительных расходов. НТПЭ должен быть определен по стоимости потерь с учетом стоимостей источников по (4), (5):

$$НТПЭ_c \% = \frac{C_{M\Sigma}}{\sum_{i=1}^N C_{\Sigma i}} 100\%. \quad (21)$$

Надо отметить также, что доля оплаты потерь в сетях предприятия-ТСО (ΔW_{Φ}), которая не компенсируется субабонентами и в результате этого при расчетах с гарантирующим поставщиком переносится на собственное потребление предприятия (что не соответствует физическим процессам в системе электроснабжения), при этом снижается. Следовательно, снижается величина затрат на электроэнергию и их доля в себестоимости готовой продукции предприятия-ТСО. Выявление точек присоединения субабонентов в этом случае зависит от конкретной схемы и технико-экономических характеристик источников питания и должно определяться индивидуально соответствующими расчетами.

Обсуждение результатов (Results and discussions)

Таким образом, в результате проведенных исследований:

1) предложена методика определения стоимости потерь электроэнергии в каждом элементе системы электроснабжения промышленного предприятия, получающего электроэнергию как от гарантирующего поставщика, так и от собственных электростанций, с учетом характеристик источников;

2) разработана методика определения долевого вклада собственных электростанций и групп точек поставки с розничного рынка системы электроснабжения в потери электроэнергии и их стоимость, а также долевого вклада собственных потребителей предприятия и потребителей-субабонентов;

3) применение изложенных методик рассмотрено применительно к условиям крупного промышленного энергоузла с градообразующим предприятием, располагающего несколькими собственными электростанциями имеющего статус территориальной сетевой организации; для объекта исследования проанализирована структура потоков мощности и финансовых потоков при оплате субабонентами услуг по передаче электроэнергии по котловому тарифу и структура вклада источников питания в суммарные потери;

4) предложен подход к корректировке индивидуального тарифа на покупку потерь с учетом взаимного расположения источников питания и потребителей в системе электроснабжения, что позволяет также уточнить необходимую валовую выручку и индивидуальный тариф для взаиморасчетов с сетевой организацией – котлодержателем;

5) даны рекомендации по выбору точек присоединения потребителей-субабонентов к системе электроснабжения предприятия-ТСО;

6) предложенные методики и рекомендации направлены на повышение степени компенсации стоимости услуг потребителями-субабонентами по передаче электроэнергии через сети предприятия-ТСО с целью снижения переноса стоимости потерь электроэнергии с субабонентов на собственное потребление предприятия. Это позволит снизить долю затрат на электроэнергию в себестоимости готовой продукции предприятия и повысить его конкурентоспособность.

Заключение (Conclusions)

В статье изложена разработанная авторами методика определения вклада источников электроэнергии и потребителей системы электроснабжения крупного промышленного предприятия – территориальной сетевой организации в потери электроэнергии и их стоимость. Предложен уточненный подход к расчету тарифа покупки потерь сетевой организацией у гарантирующего поставщика и к расчету нормативов технологических потерь электроэнергии с учетом стоимости потерь. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен повышением полноты компенсации затрат на передачу электроэнергии по сетям предприятия со стороны потребителей-субабонентов.

Литература

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.
2. Lezama F., Soares J., Hernandez-Leal P., Kaisers M., Pinto T., Vale Z. Local energy markets: paving the path toward fully transactive energy systems // IEEE Trans. on Power Systems. 2019. V. 34. No. 5. P. 4081-4088.
3. Zhang H., Zhao D., Gu C., Li F., Wang B. Economic optimization of smart distribution networks considering real-time pricing // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2014. V. 2. No. 4. P. 350-356.
4. Mahnitko A., Umbrashko I. Determination of electricity nodal prices using Lagrange method // Journal of Electrical & Electronics Engineering. 2009. V. 2. Iss. 3. P. 43-47.
5. Васьковская Т.А. Показатели разницы узловых цен на оптовом рынке электроэнергии // Электричество. 2007. №2. С. 23-27.
6. Васьковская Т.А., Володин Д.В. Определение зон влияния сетевых ограничений на узловые цены // Изв. РАН. Энергетика. 2014. №1. С. 74-83.
7. Varkani A.K., Seifi H., Sheikh-El-Eslami M.K. Locational marginal pricing-based allocation of transmission capacity in multiple electricity markets // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. V. 8. Iss. 5. P. 983-994.
8. Jin Y., Wang Zh., Jiang Ch., Zhang Y. Dispatch and bidding strategy of active distribution network in energy and ancillary services market // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2015. V. 3. Iss. 4. P. 565-572.
9. Mohammad N., Mishra Y. Retailer's risk-aware trading framework with demand

response aggregators in short-term electricity markets // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13. Iss. 13. P. 2611-2618.

10. Murali M., Sailaja Kumari M., Sydulu M. Estimation of locational marginal price in a restructured electricity market with different loss cases using Seed Genetic Algorithm // *Arabian Journal for Science & Engineering*. 2014. V. 39. Iss. 2. P. 1089-1106.

11. Бартоломей П.И., Паздерин А.А. Задача потокораспределения потерь электроэнергии и поправочные коэффициенты к тарифам на передачу // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. №3(44). С. 4-9.

12. Абдуллазянов Э.Ю. Грачева Е.И., Альзакаар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2022. № 6(24). С. 3-12.

13. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2020. №5. С. 71-82.

14. Савенко А.Е., Рыбин А.Г. Оптимизация схемы присоединения рассредоточенных источников электроэнергии к распределительным электрическим сетям Темрюкского района // *Вестник КГЭУ*. 2022. №1(53). С. 76-85.

15. Васильева М.В., Китушин М.Г. Измерение и экономическая оценка услуг электросетевых предприятий // *Известия РАН. Энергетика*. 2012. №4. С. 49-56.

16. Паздерин А.А., Паздерин А.В. Представление процесса передачи электроэнергии направленными потоками электроэнергии и стоимости в схеме сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С. 31-36.

17. Паздерин А.В., Паздерин А.А. Применение принципа равенства относительных приростов потерь в электрических сетях // *Энергия единой сети*. 2018. №1(36). С. 62-70.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение потерь электроэнергии и адресности электропотребления в системах тягового электроснабжения по данным АСКУЭ // *Проблемы энергетики*. 2011. №11-12. С. 72-82.

Автор публикации

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП) Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова).

References

1. Zhelezko YuS, Artem'yev AV, Savchenko OV. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov. Moscow.: Izdatel'stvo NTs ENAS, 2004.

2. Lezama F, Soares J, Hernandez-Leal P, et al. Local energy markets: paving the path toward fully transactive energy systems. *IEEE Trans. on Power Systems*. 2019; 34(5):4081-4088. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2833959.

3. Zhang H, Zhao D, Gu C, et al. Economic optimization of smart distribution networks considering real-time pricing. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2014; 2(4):350-356. doi: <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0086-7>.

4. Mahnitko A, Umbrashko I. Determination of electricity nodal prices using Lagrange method. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*. 2009; 2(3):43-47.

5. Vas'kovskaya T.A. Indicators characterizing the difference in nodal prices on the wholesale market of electricity. *Elektrichestvo*. 2007; 2:23-27.

6. Vas'kovskaya TA, Volodin DV. The determination of congestion zones in electricity markets with nodal pricing. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*. 2014; 1:74-83.

7. Varkani AK, Seifi H, Sheikh-El. Eslami M.K. Locational marginal pricing-based allocation of transmission capacity in multiple electricity markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2014;8(5):983-994. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0544.

8. Jin Y, Wang Zh, Jiang Ch, Zhang Y. Dispatch and bidding strategy of active distribution network in energy and ancillary services market. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2015; 3(4):565-572. doi: <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0161-8>.

9. Mohammad N, Mishra Y. Retailer's risk-aware trading framework with demand response aggregators in short-term electricity markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019; 13(13):2611-2618. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6294.

10. Murali M, Sailaja Kumari M, Sydulu M. Estimation of locational marginal price in a restructured electricity market with different loss cases using Seed Genetic Algorithm. *Arabian Journal for Science & Engineering*. 2014; 39(2):1089-1106. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0699-6>.

11. Bartolomey PI, Pazderin AA. Electric energy loss flow problem and correction factors for transmission tariff. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2019; 44(3):4-9. doi 10.18503/2311-8318

12. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Alzakkar A, et al. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(6):3-12. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

13. Kikot EA, Gazizov FN. Selection of the structure of thermal generation in cities of the russian federation when actualizing the heat supply schemes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 5:71-82. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82.

14. Savenko AE, Rybin AG. Optimization of the scheme of connection of reduced electric power sources to the distribution electric networks in Temryuk region. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2022; 53(1):76-85.

15. Vasiliyeva MV, Kitushin MG. Measurement and economic estimation of grid companies service. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*. 2012; 4:49-56.

16. Pazderin AA, Pazderin AV. Representation of the electric energy distribution process in an electric network by directed energy and cost flows. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2017;34(1):31-36. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-31-36.

17. Pazderin AV, Pazderin AA. Primenenie printsipa ravenstva otnositel'nykh prirostov poter' v ehlektricheskikh setyakh. *Energy of Unified Grid*. 2018; 36(1):62-70.

18. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Definition of losses of the electric power and power consumption addressing in systems of a traction electrical supply according to ASCEM. *Problemy energetiki*. 2011; 11-12:72-82.

Author of the publication

Aleksei V. Malafeev –Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
Смежные шифры в рамках группы научной специальности:*

Получено 10.05.2023 г.

Отредактировано 29.05.2023 г.

Принято 13.06.2023 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЙЕРА ЛЕНТОЧНОГО ТИПА С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ СКОРОСТИ

Мещеряков В.Н., Мантухов Е.С., Сдвижков А.В.

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в возможности применения различных наблюдателей скорости с использованием асинхронного двигателя с векторным управлением, предлагаемых для использования на наклонном ленточном конвейере, транспортирующего железорудный концентрат. *ЦЕЛЬЮ* является сравнительное исследование динамики асинхронного электропривода с векторным управлением при использовании датчика скорости и наблюдателей скорости различного типа. *МЕТОДАМИ* исследования являются разработка математических моделей наблюдателей, компьютерное моделирование и анализ динамических режимов работы электропривода при использовании датчика скорости и различных наблюдателей скорости в условиях работы наклонного ленточного конвейера, анализ точности измерения скорости рассмотренными наблюдателями с учетом влияния теплового изменения активного сопротивления обмоток асинхронного двигателя. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* С помощью компьютерного моделирования получены графики переходных процессов, проведено сравнение результатов моделирования динамических характеристик и показателей качества в системах электропривода с датчиком скорости и с наблюдателями скорости. Определена степень влияния теплового изменения активного сопротивления обмоток асинхронного двигателя на работу наблюдателей разного вида. В результате выполненных исследований установлено, что наблюдатель скорости полного порядка обеспечивает минимальную погрешность измерения скорости и может использоваться в электроприводе наклонного ленточного конвейера.

Ключевые слова: конвейер ленточного типа; асинхронный электропривод; векторное управление; адаптивные наблюдатели скорости; моделирование; показатели качества.

Для цитирования: Мещеряков В.Н., Мантухов Е.С., Сдвижков А.В. Исследование векторной адаптивной системы управления асинхронным электроприводом конвейера ленточного типа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.25. № 3. С.41-54. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-41-54.

STUDY OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BELT CONVEYOR

VN. Meshcheryakov, ES. Mantukhov, AV. Sdvizhkov

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia

Abstract: *THE POSSIBILITY* of using various speed observers in a vector-controlled asynchronous electric drive system proposed for use on an inclined conveyor belt transporting iron ore concentrate is considered. *THE PURPOSE* is a comparative study of the dynamic characteristics of the vector control system of an asynchronous electric drive when using a speed sensor and speed observers of various types. *THE RESEARCH METHODS* are development of mathematical models of observers, computer modeling and analysis of dynamic modes of operation of the asynchronous electric drive vector control system when using a speed sensor and various speed observers in the conditions of operation of an inclined conveyor belt, analysis of the accuracy of speed measurement by the observers considered, taking into account the influence of thermal changes in the active resistance of the asynchronous motor windings. With the help of computer modeling, graphs of transient processes in the asynchronous electric drive system with vector control are obtained, the results of modeling dynamic characteristics and quality indicators in systems with a speed sensor mounted on the motor shaft and with speed observers. The degree

of influence of the thermal change in the active resistance of the windings of an asynchronous motor on the work of observers of different types is determined. AS A RESULT of the studies carried out, it was found that the full-order speed observer provides a minimum error in speed measurement and can be used in an asynchronous electric drive system with vector control when it is used on an inclined conveyor belt.

Keywords: *belt-type conveyor; asynchronous electric drive; vector control; adaptive speed observers; modeling; quality; indicators.*

For citation: Meshcheryakov VN, Mantuhov ES, Gladyshev VE, Sdvizhkov AV. Study of adaptive control system of asynchronous electric drive belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(3):41-54. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-41-54.

Введение

Исследования направлены на повышение работоспособности асинхронного электропривода конвейера ленточного типа за счет применения бездатчиковой системы идентификации скорости двигателя, что определяет их актуальность. Целью исследования является сравнение пусковых характеристик асинхронного электропривода с векторным управлением, полученных методом компьютерного моделирования, при использовании датчика скорости и наблюдателей скорости различного типа в сложных условиях работы электропривода на наклонном ленточном конвейере с диапазоном изменения температуры окружающей среды в летний и зимний периоды превышающим 60° С, и анализ точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при температурном изменении сопротивления обмотки статора. Научная значимость исследований заключается в получении новых результатов, дополняющих имеющийся в литературных источниках системные данные о точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при изменении сопротивления обмотки статора, вследствие изменения температуры окружающей среды в рассматриваемом диапазоне.

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к надежности и энергоэффективности работы используемого оборудования. Наклонный ленточный конвейер ПБ-1, работающий на предприятии ПАО «Михайловский ГОК», оснащенный достаточно энергоэффективной и относительно простой системой частотного регулирования асинхронного электропривода со скалярным управлением, позволяющей выполнять регулирование от датчика скорости, смонтированного на валу двигателя, работает в тяжелых условиях окружающей среды при наличии пыли в воздухе, высокой влажности, поэтому использование датчика скорости снижает надежность работы электропривода [1]. В случае перехода на систему векторного управления асинхронным электроприводом, возможно применение бездатчиковой системы, это является перспективным решением, повышающим надежность и качество управления механизмами общепромышленного назначения, например ленточными конвейерами [2-4]. Данное решение позволит уменьшить стоимость привода при проектировании, так как нет необходимости в закупке дорогостоящего оборудования, в монтаже датчика и выполнении коммуникации с ним. По результатам исследования можно будет сделать вывод о наиболее подходящем наблюдателе к системе управления электропривода.

Анализ известных исследований, направленных на совершенствование асинхронного электропривода с использованием наблюдателей скорости различного типа [4], показывает, что точность идентификации скорости требует точных данных сопротивлений обмотки асинхронного двигателя (АД), которые подвержены температурным изменениям в условия работы ленточного конвейера со значительными сезонными изменениями температуры окружающей среды.

С учетом этих особенностей работы электропривода конвейера были сформулированы требования к наблюдателю скорости:

- минимум математических вычислений;
- пониженная чувствительность к неточности определения параметров, вводимых в модель;
- возможность его физической интерпретации.

Проведение исследований работы наблюдателей скорости в энергосберегающих системах электропривода переменного тока, используемых на разных промышленных механизмах [5-7], в том числе векторных систем с элементами адаптивного управления [8-10], наиболее удобно проводить методом имитационного компьютерного моделирования

[15] с использованием пакетов программ, например в программной оболочке *MATLAB Simulink*.

Методы

Работа асинхронного электропривода конвейера ПБ-1 с АД типа АИР355S4, $P_H = 250$ кВт, осуществляющего транспортировку в складское помещение железорудного концентрата, исследована методом компьютерного моделирования. На рисунке 1 приведена схема конвейера ПБ-1, взята из проекта по реконструкции конвейера на предприятии ПАО «Михайловский ГОК».

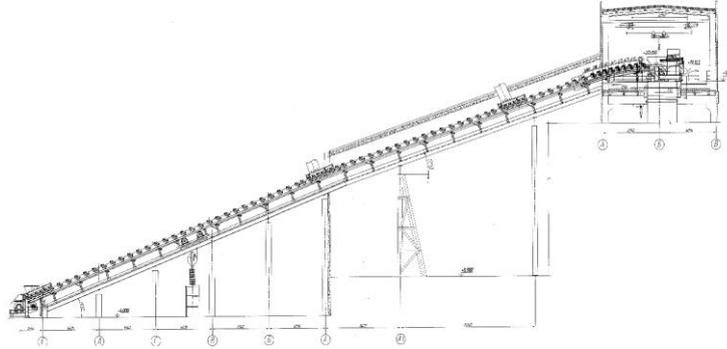


Рис.1. Схема конвейера

Fig. 1. Pipeline diagram

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Кинематическая схема электропривода конвейера содержит редуктор, что позволяет согласовать скорость двигателя и механизма, а также увеличить момент, приложенной к приводному барабану. С противоположной стороны конвейера установлен неприводной барабан для обеспечения движения ленты. Для регулирования натяжения ленты используется натяжная станция. Поступающий на ленту конвейера ПБ-1 сыпучий материал загружается достаточно равномерно, изменение статической нагрузки на валу двигателя происходит плавно. Механизм является высоко инерционным, время разгона составляет 150 с. Температура обмоток двигателя не остается постоянной, поскольку на температуру влияет статическая нагрузка двигателя, кроме того, изменяется температура окружающей среды. Тепловое изменение сопротивления обмоток вносит погрешность в работу наблюдателя скорости, что необходимо учитывать при его выборе и синтезе параметров.

Система управления требует наличия информации о скорости электропривода, которую можно получить или от датчика скорости, или от наблюдателя скорости. Общий вид многофункциональной схемы электропривода, оснащенного наблюдателем скорости, разработанной в работе [4], представлен на рисунке 2.

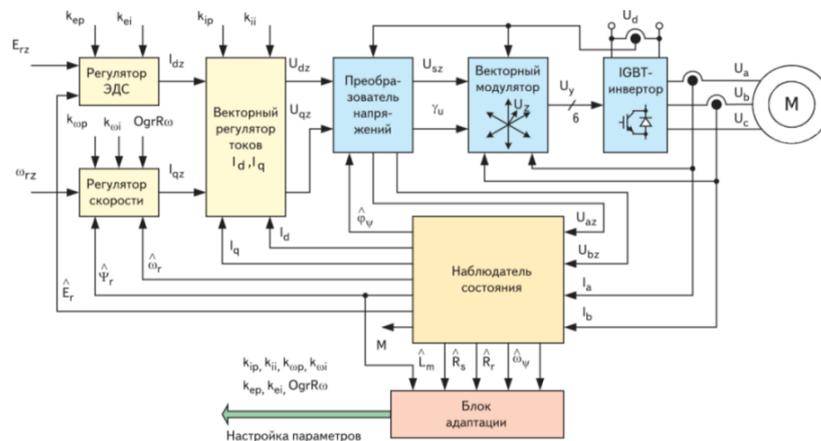


Рис. 2 - Многофункциональная схема Fig. 2/ Functional diagram vector control of an asynchronous drive with an observer

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Исследование работы наблюдателей скорости в рассматриваемой системе электропривода, результаты которых приведены в данной статье, проводилось методом компьютерного моделирования с использованием рассмотренных ниже блок-схем моделей,

разработанных авторами статьи. Временные зависимости переменных двигателя при применении датчика скорости и наблюдателей скорости, приведенные ниже, получены авторами статьи в результате выполненного компьютерного моделирования.

На рисунке 3 приведена компьютерная модель векторной системы управления АД, позволяющая моделировать пуск электропривода при использовании датчика скорости.

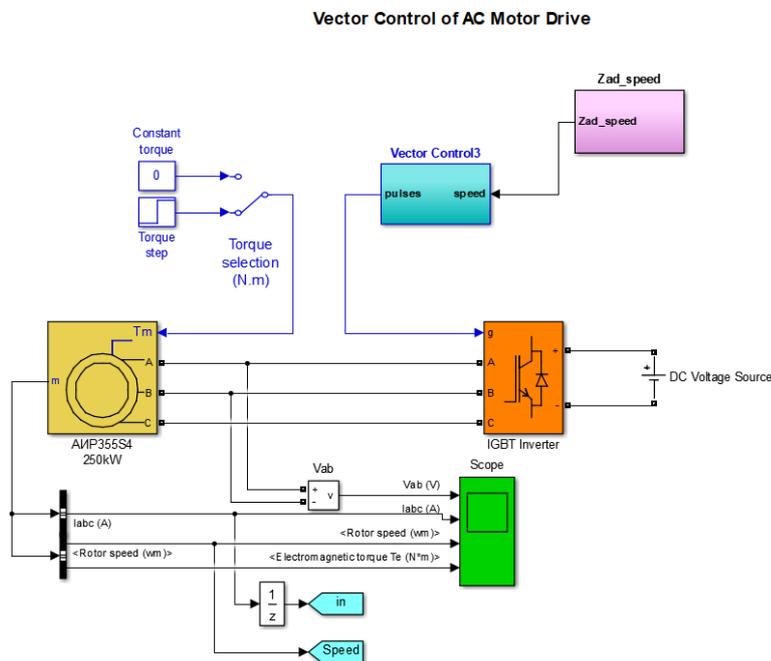


Рис. 3. Компьютерная модель векторной системы управления *Fig.3. Physical model of the vector control system*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты

Результаты моделирования пуска электропривода с датчиком скорости, показаны на рисунке 4.

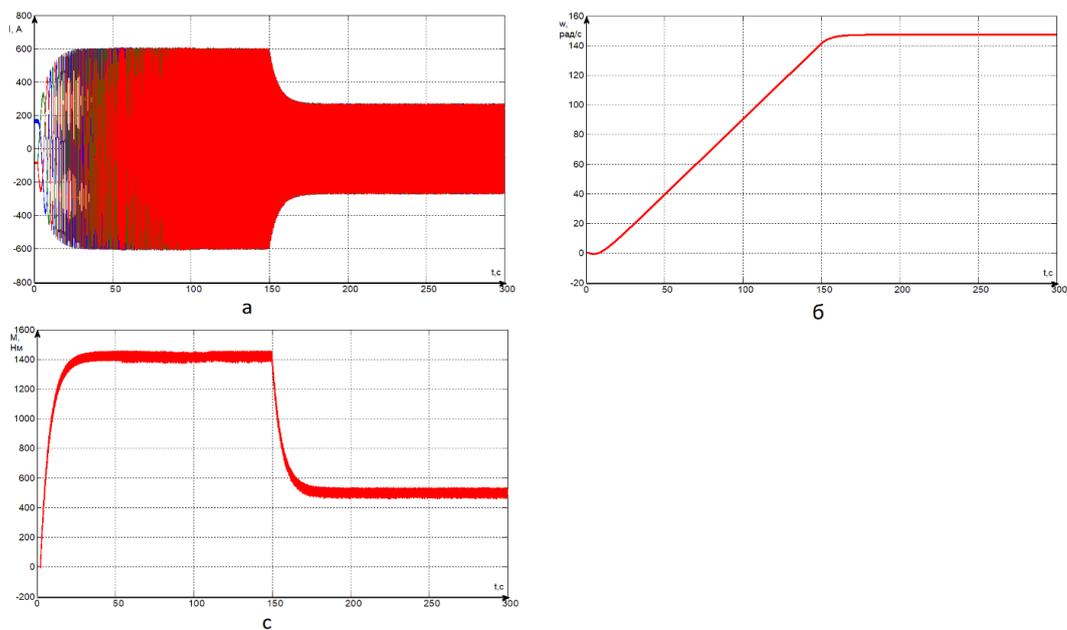


Рис. 4 - Временные зависимости: а - тока статора; б - скорости; в - момента в системе с датчиком скорости *Fig. 4- Time dependences: a-stator current; b-speed; c-moment in a system with a speed sensor*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Схема компьютерной модели электропривода с наблюдателем скорости, показана на рисунке 5.

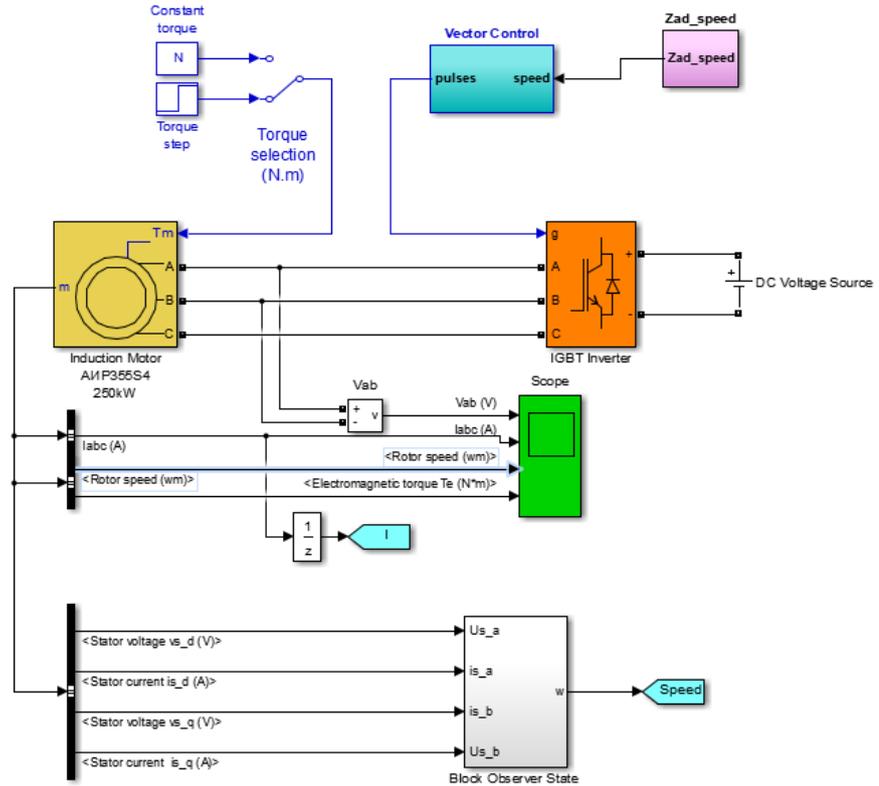


Рис.5. Модель системы управления с наблюдателем скорости

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора система уравнения имеет вид:

$$\Psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(\int (U_{s\alpha} - I_{s\alpha} \cdot R_s) dt - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\alpha} \right),$$

$$\Psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(\int (U_{s\beta} - I_{s\beta} \cdot R_s) dt - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\beta} \right),$$

$$\hat{\Psi}_{r\alpha} = \int \left(\frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\alpha} \cdot L_m - \Psi_{r\alpha}) - p_{II} \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta} \right),$$

$$\hat{\Psi}_{r\beta} = \int \left(\frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\beta} \cdot L_m - \Psi_{r\beta}) + p_{II} \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha} \right).$$

Символом $\hat{}$ обозначается оценочное значение из модели ротора.

Скорость определяется по формуле

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot \left(\hat{\Psi}_{r\alpha} \cdot \Psi_{r\beta} - \Psi_{r\beta} \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha} \right),$$

Реализация адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с фильтром представлена на рисунке 6.

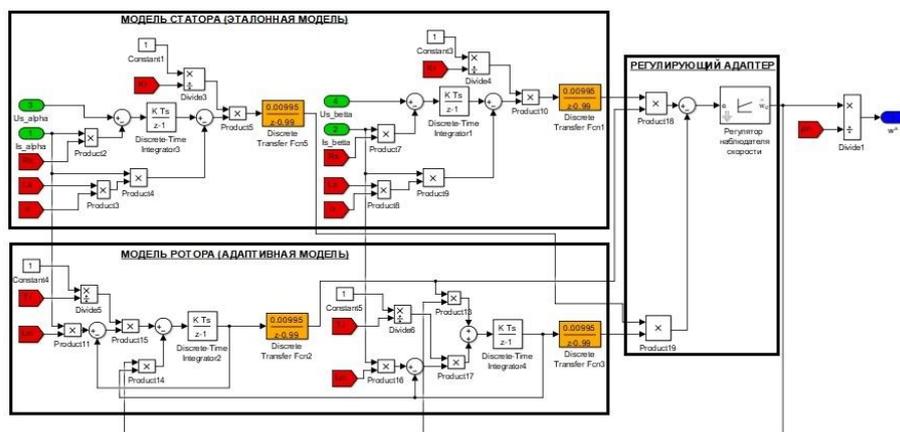


Рис. 6 - Модель адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с применением сглаживающего фильтра
 Fig. 6 - Model adaptive the observer working on based on comparisons flow coupling of the rotor with the use of smoothing filter

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При моделировании рассматривались временные зависимости скорости, полученные с наблюдателя, а также тока статора и момента двигателя, полученные из модели электропривода.

Результаты моделирования адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с фильтром, установленным на выходе модели статора, показаны синим цветом на рисунке 7, а и 7, б, на этих же рисунках, а также на последующих рисунках красным цветом показаны графики в системе с датчиком скорости.

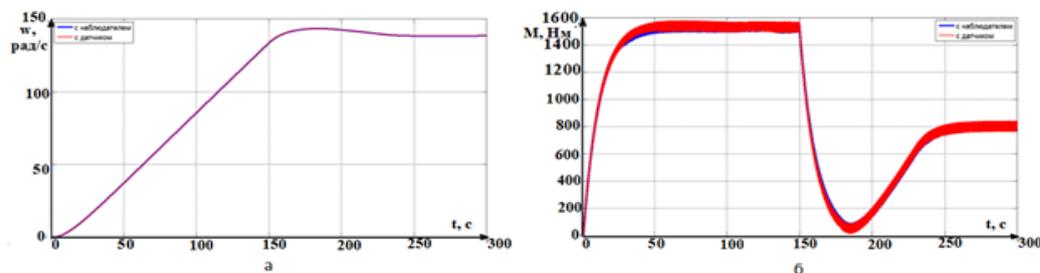


Рис. 7. Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости при наличии выходного фильтра в цепи статора и ротора; б – сравнительная характеристика момента при наличии выходного фильтра в цепи статора и ротора
 Fig. 7. Time dependences: a- stator current; b-speed in the presence of an output filter in the stator and rotor circuits

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Из результатов моделирования следует, что наблюдатель обеспечивает практически идентичные с датчиком скорости зависимости по скорости и моменту за исключение переходных процессов, где колебания по моменту увеличиваются, что негативно сказывается на приводе.

Был исследован метод снижения колебаний момента, заключающийся в замене в системе управления интегратора на аperiodическое звено и добавлении ПИ-звена (на рисунке выделен желтым цветом). Реализация математической модели такого адаптивного наблюдателя представлена на рисунке 8.

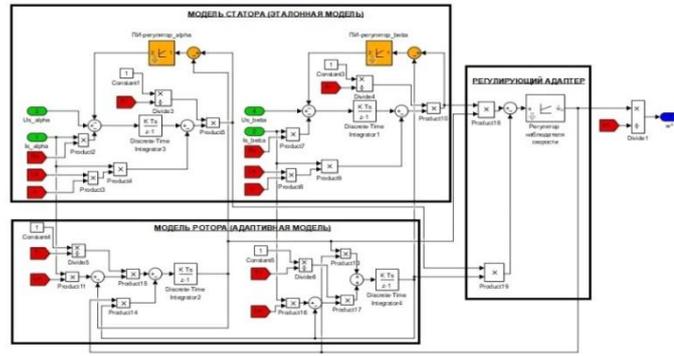


Рис. 8 Модель адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с аperiодическим фильтром и ПИ-звеном

Fig. 8 - Model of an adaptive observer operating on the basis of identifying the rotor flux linkage using an aperiодic link filter and setting a PI controller

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Временные зависимости, характерные для адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцеплений ротора с аperiодическим фильтром и ПИ-звеном приведены на рисунках 9, а и 9, б.

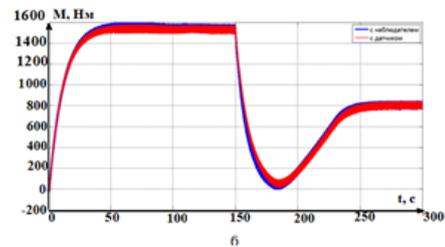
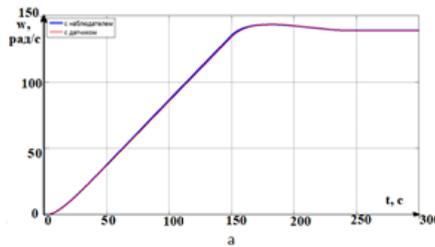


Рис. 9. Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости при добавлении ПИ-звена; б – сравнительная характеристика момента при добавлении ПИ-звена

Fig. 9. Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer limiting the flow coupling of the rotor

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Наблюдатель с дополнительным ПИ-звеном более надежен, чем описанные выше системы управления с ограничением потокосцепления ротора, добавление ПИ-звена снижает статическую ошибку даже при значениях сопротивления, близких к допустимым предельным.

Наблюдатели, вычисляющие параметры по результатам анализа тока статора, характеризуются высокой точностью определения параметров в диапазоне низких скоростей, поскольку расчетные и измеренные значения линейны.

Уравнения, связывающие потокосцепление ротора и ток статора имеют вид

$$T_r \cdot \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \psi_{r\alpha} = I_{s\alpha} \cdot L_m - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\beta},$$

$$T_r \cdot \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \psi_{r\beta} = I_{s\beta} \cdot L_m - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\alpha}.$$

Выражения для оцениваемых значений тока статора имеют вид

$$\hat{I}_{s\alpha} = \frac{1}{L_m} \cdot \left[\psi_{r\alpha} + T_r \cdot \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\beta} \right],$$

$$\hat{I}_{s\beta} = \frac{1}{L_m} \cdot \left[\psi_{r\beta} + T_r \cdot \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\alpha} \right].$$

Разница между реальными и оцениваемыми токами

$$I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} = \frac{T_r}{L_m} \cdot \psi_{r\beta} \cdot \left(\omega_e - \hat{\omega}_e \right),$$

$$I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta} = -\frac{T_r}{L_m} \cdot \Psi_{r\alpha} \cdot \left(\omega_e - \hat{\omega}_e \right).$$

Можно получить выражение

$$\omega_e - \hat{\omega}_e = K \cdot \left[\left(I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} \right) \cdot \Psi_{r\beta} + \left(\hat{I}_{s\beta} - I_{s\beta} \right) \cdot \Psi_{r\alpha} \right],$$

где $K = \frac{L_m}{T_r \cdot (\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2)}$ – постоянный коэффициент.

Реализация адаптивного наблюдателя, анализирующего ток статора, представлена на рисунке 10.

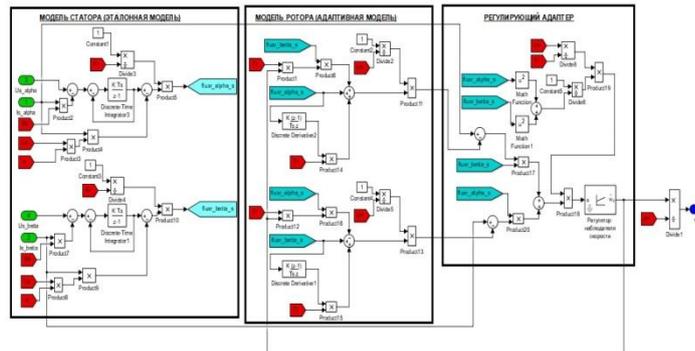


Рис.10. Модель адаптивного наблюдателя анализирующего ток статора Fig. 10. Model of adaptive stator current observer

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты, полученные при моделировании адаптивного наблюдателя скорости, анализирующего ток статора, представлены на рисунке 11.

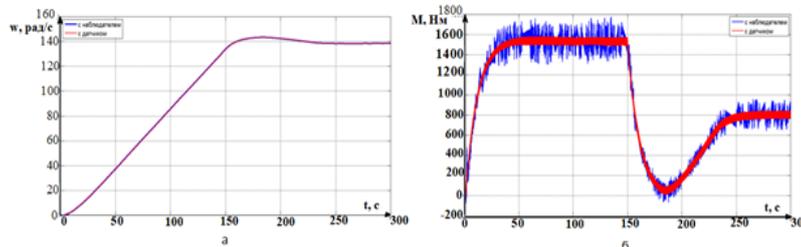


Рис. 11 Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости от наблюдателя по току; б – сравнительная характеристика момента от наблюдателя по току Fig. 11. Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer analyzing the current

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты показали, что фактическая скорость и скорость, рассчитанная наблюдателем, анализирующим ток статора, практически совпадают. На графике момента, полученного при работе наблюдателя, имеются колебания момента двигателя. Такие колебания имеют негативное влияние на привод, на его надежность и долговечность.

Наблюдатель, выполненный на основе определения ЭДС, имеет большую погрешность при низкой скорости двигателя, когда противо-ЭДС имеет малое значение.

Система уравнений наблюдателя по ЭДС имеет следующий вид

$$E_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(U_{s\alpha} - I_{s\alpha} \cdot R_s - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\alpha} \cdot \frac{d}{dt} \right),$$

$$E_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(U_{s\beta} - I_{s\beta} \cdot R_s - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\beta} \cdot \frac{d}{dt} \right),$$

$$E_{r\alpha} = \frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\alpha} \cdot L_m - \Psi_{r\alpha}) - p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta},$$

$$E_{r\beta} = \frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\beta} \cdot L_m - \psi_{r\beta}) + p_{\pi} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}$$

Скорость выражается

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot \left(\hat{E}_{r\alpha} \cdot E_{r\beta} - \hat{E}_{r\beta} \cdot E_{r\alpha} \right)$$

Реализация адаптивного наблюдателя с идентификацией ЭДС представлена на рисунке 12.

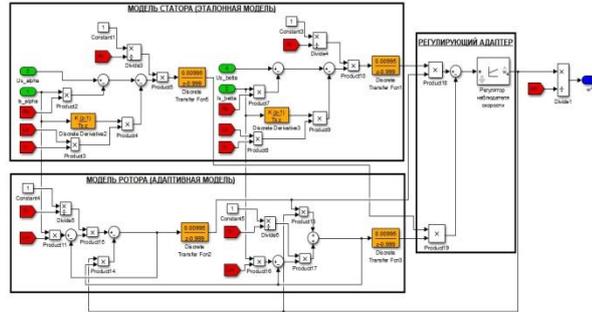


Рис. 12 - Модель адаптивного наблюдателя по ЭДС *Fig.12. Model of an adaptive EMF observer*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты моделирования адаптивного наблюдателя скорости на основе идентификации ЭДС ротора показаны на рисунках 13, а и 13, б.

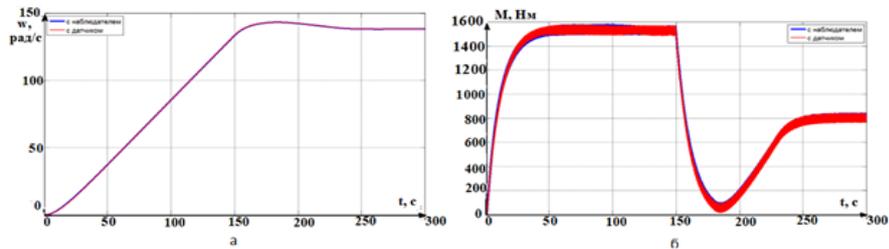


Рис. 13 Временные зависимости: *a* – сравнительная характеристика скорости от наблюдателя по ЭДС; *б* – сравнительная характеристика момента от наблюдателя по ЭДС *Fig. 13- Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer identifying EMF*

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author author

Из результатов моделирования видно, что скорость и момент, фактические и рассчитанные с использованием наблюдателя практически совпадают, но на графике по моменту видно, что во время переходных процессов имеется погрешность и наблюдаются колебания.

Наблюдатель полного порядка в ходе вычислений использует все доступные данные электромагнитных процессов, что увеличивает объем вычислений. Данный наблюдатель обеспечивает минимальную статическую ошибку и подвергается меньшему влиянию от изменения параметров во время работы привода. Выражения, описывающие наблюдатель полного порядка, можно получить путем рассмотрения дифференциальных уравнений статора.

$$\frac{d}{dt} \psi_{r\alpha} = \frac{1}{k_r} \cdot U_{s\alpha} - \frac{1}{k_r} \cdot I_{s\alpha} \cdot R_s - \frac{\sigma \cdot L_s}{k_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{s\alpha},$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{r\beta} = \frac{1}{k_r} \cdot U_{s\beta} - \frac{1}{k_r} \cdot I_{s\beta} \cdot R_s - \frac{\sigma \cdot L_s}{k_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{s\beta}.$$

Выразим из уравнений производные тока статора

$$\frac{d}{dt} I_{s\alpha} = - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \cdot I_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma \cdot L_s} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot U_{s\alpha},$$

$$\frac{d}{dt} I_{s\beta} = -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \cdot I_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma \cdot L_s} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot U_{s\beta}.$$

Используя систему обозначений, получим данные уравнения в удобном виде

$$\frac{dI_{s\alpha}}{dt} = a_{r11} \cdot I_{s\alpha} + a_{r12} \cdot \Psi_{r\alpha} - a_{i12} \cdot \Psi_{r\beta} + b_1 \cdot U_{s\alpha},$$

$$\frac{dI_{s\beta}}{dt} = a_{r11} \cdot I_{s\beta} + a_{r12} \cdot \Psi_{r\beta} + a_{i12} \cdot \Psi_{r\alpha} + b_1 \cdot U_{s\beta},$$

где $a_{r11} = -\left(\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot T_r}\right)$, $a_{r12} = \frac{L_m}{\sigma \cdot T_r \cdot L_s \cdot L_r}$, $a_{i12} = -\frac{L_m \cdot \omega_e}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}$,

$$b_1 = \frac{1}{\sigma \cdot L_s}.$$

Производные проекций потокоцеплений ротора определяются

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = a_{r22} \cdot \Psi_{r\alpha} - a_{i22} \cdot \Psi_{r\beta} + a_{r21} \cdot I_{s\alpha},$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = a_{r22} \cdot \Psi_{r\beta} + a_{i22} \cdot \Psi_{r\alpha} + a_{r21} \cdot I_{s\beta},$$

где $a_{r21} = \frac{L_m}{T_r}$, $a_{r22} = -\frac{1}{T_r}$, $a_{i22} = \omega_e$.

Совместное рассмотрение приведенных уравнений позволяет представить закон адаптации в следующем виде

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \cdot \left(\Delta I_{s\alpha} \cdot \hat{\Psi}_{r\beta} - \Delta I_{s\beta} \cdot \hat{\Psi}_{r\alpha}\right).$$

Реализация адаптивного наблюдателя полного порядка представлена на рисунке 14.

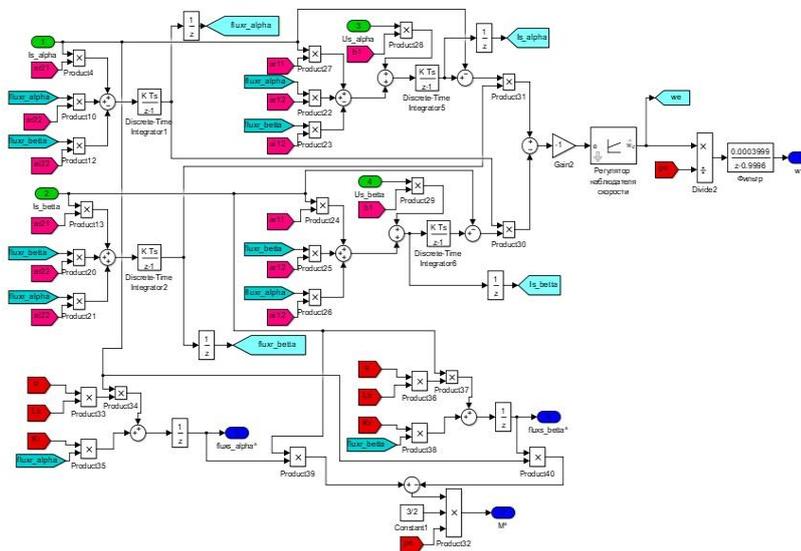


Рис. 14 Модель адаптивного наблюдателя Fig.14 Adaptive observer model full order полного порядка

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author

Результаты, полученные при моделировании наблюдателя полного порядка, показаны на рисунках 15, а и 15, б.

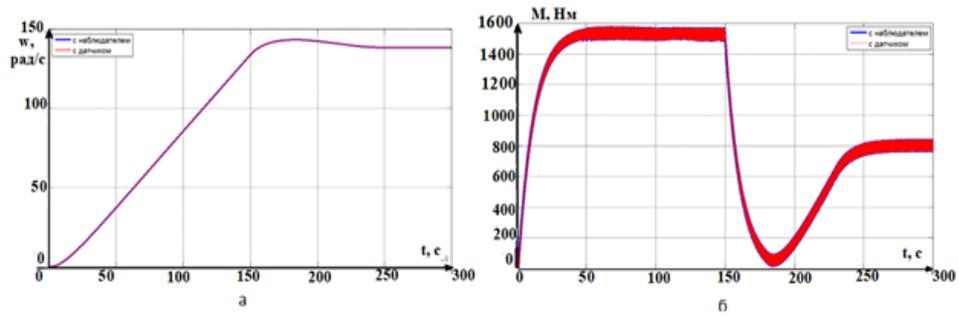


Рис. 15 Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости от наблюдателя полного порядка; б – сравнительная характеристика момента от наблюдателя полного порядка

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author

Из результатов моделирования следует, что графики скорости и момента от наблюдателя и фактические измеренные датчиком скорости практически совпадают, так же можно отметить, что наблюдатель имеет малую статическую ошибку при крайних значениях погрешности сопротивления, вносимые в работу наблюдателя.

Для более детального анализа результатов исследования были определены статические ошибки определения скорости при условии внесения погрешности в значения активного сопротивления статора и активного сопротивления ротора. Для анализа статической ошибки определения скорости использован метод интегрирования мгновенных значений выходных переменных электропривода. Выражение, которое позволяет вычислить интегральный критерий качества, имеет вид

$$I(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) = \frac{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) - \omega_2(t)| dt}{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\omega_2(t)| dt} \cdot 100\%$$

где $\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t)$ – значения скорости, полученные от наблюдателя;

$\omega_2(t)$ – значения скорости получение от установленного датчика;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – параметры электропривода.

Структурная схема, реализующая метод вычисления параметрической робастности, приведена на рисунке 16.

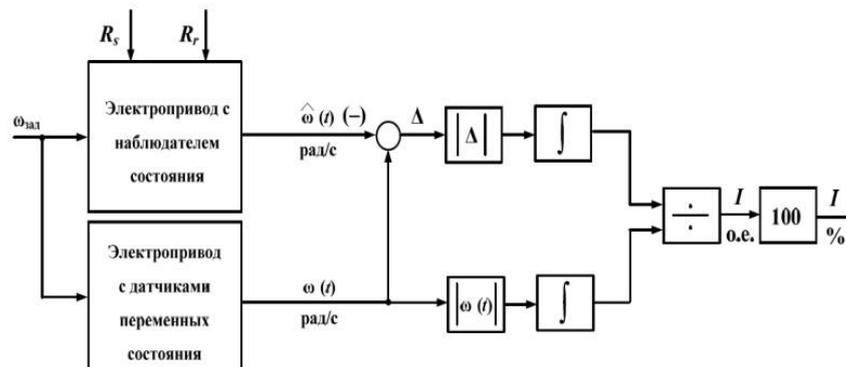


Рис. 16 Структурная схема, реализующая метод вычисления интегрального критерия качества

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Во время работы в АД происходят изменения параметров, наибольшее влияние на точность вычислений имеют активные сопротивления обмоток. Результаты определения статической ошибки при увеличении на 40% и уменьшении на 40% значений активных сопротивлений обмоток двигателя представлены в таблице 1.

Максимальная ошибка определения скорости адаптивными наблюдателями при изменении активных сопротивлений статора и ротора

Maximum speed error by adaptive observers when changing stator and rotor active resistances

Предельное сопротивление обмоток при изменениях температуры	Вид исследуемого адаптивного наблюдателя				
	Наблюдатель по потокоцеплению ротора с фильтром (%)	Наблюдатель по потокоцеплению ротора с фильтром и ПИ-звеном (%)	Наблюдатель, анализирующий ток статора (%)	Наблюдатель, анализирующий ЭДС (%)	Наблюдатель полного порядка (%)
1,4R _s	98,36	1,83	53,78	0,99	2,3
1,4R _r					
1,4R _s	94,72	0,65	10,19	0,761	0,34
0,6R _r					
0,6R _s	5,616	16,09	26,69	1,232	2,193
1,4R _r					
0,6R _s	1,07	6,241	9,324	1,13	0,5
0,6R _r					

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Выводы

Современные программные средства компьютерного моделирования позволяют моделировать динамические процессы в системе асинхронного электропривода с векторным управлением с использованием наблюдателей скорости различного типа.

Вычислительная мощность современных управляющих контроллеров делает возможной практическую реализацию и внедрение наблюдателей скорости в системы управления асинхронными электроприводами, что позволяет отказаться от использования датчиков скорости, устанавливаемых на валу двигателей и повысить надежность электроприводов различных производственных механизмов, например наклонных конвейеров.

Анализ результатов компьютерного моделирования систем векторного управления АД с рассматриваемыми наблюдателями показал, что при условиях изменения сопротивления обмоток асинхронного двигателя, наибольшую точность идентификации скорости обеспечивают наблюдатель, анализирующий ЭДС, и наблюдатель полного порядка.

Выполненные исследования показали, что наблюдатель полного порядка позволяет получить наилучшие результаты идентификации скорости электропривода, и возможна его практическая реализация в системе асинхронного электропривода с векторным управлением, следовательно этот электропривод может быть рекомендован для использования на наклонном конвейере ленточного типа.

Полученные в данном исследовании динамические характеристики системы электропривода с векторным управлением и наблюдателями скорости расширяют и систематизируют известные из других источников данные о точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при температурном изменении сопротивления обмотки статора. Поскольку изменения температуры окружающей среды в рассмотренном диапазоне характерны для центральной и северной части Российской Федерации, электроприводы и средства автоматики, установленные на открытой территории предприятий, должны выбираться с учетом этих особенностей климатической зоны.

Результаты исследований могут быть использованы на рассмотренном наклонном ленточном конвейере, а также при проектировании и модернизации электроприводов механизмов общепромышленного и специального назначения с регулируемыми асинхронными электроприводами с наблюдателями скорости.

Литература

1.Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
 2.Синюкова, Т. В., Сенцов Е.В. Синтез идентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN // Приборы и системы. Управление,

контроль, диагностика. 2019 г. № 9. С. 13-20. DOI 10.25791/pribor.09.2019.870.

3. Калачев, Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе (записки дилетанта) [Текст] / Ю.Н. Калачев. – М., 2015. – 60 с.

4. Stanimir Valtchev; Viktor Meshcheryakov; Elena Gracheva etc, Energy-Saving Control for Asynchronous Motor Motion System Based on Direct Torque Regulator Energies 2023, Volume 16, Issue 9, 3870

5. Титов С.С. Разработка технологии и оборудования для индукционной осесимметричной закалки мелющих стальных шаров / С.С. Титов., В.Н. Мещеряков, И.О. Леушин, О.В. Фёдоров О.В. // Черные металлы. 2020. № 6. С. 11-16.

6. Сенцов Е.В. Моделирование бездатчиковой системы управления электропривода печного рольганга с применением нейросетевых объектов / Е.В. Сенцов, В.Н. Мещеряков // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1 (58). С. 49-56.

7. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 4-11.

8. T. V. Sinyukova, E. V. Sentsov and A. V. Sinyukov, "Neural Network Speed Observers," 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 320-324, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484.

9. Himanshu Swami, Amit Kumar Jain, "An Improved Scalar Controlled Drive Based on Steady State Model of Vector Controlled Drive for Squirrel Cage Induction Motor", 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Kyoto. 2021.pp. 1-5. doi:10.1109/ISIE45552.2021.9576415

10. Alexander Pugachev, Andrey Kosmodamianskiy, "Induction Motor Scalar Control System with Power Losses Minimization", 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). sochi. 2019.pp. 1-5. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8742951.

11. Куксин, А.В., Романов А.В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода // Электротехника. 2009. № 11.

12. Фираго, Б.И. Векторные системы управления электроприводами [Текст]: учебное пособие / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев. – Минск: Высшая школа, 2016. – 159 с.

13. Афанасьев, К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Афанасьев Кирилл Сергеевич. – Томск, 2015. – 106 с.

14. Трегубова К.А. Обзор существующих наблюдателей состояния в векторном электроприводе / К.А. Трегубова, Т.В. Синокова // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки. Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 2018. С. 152-154.

15. Zhao Q., Yang Z., Sun X., Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter // International Journal of Electronics. 2020. V. 107. N 9. P. 1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>

Авторы публикации

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры Электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Мантухов Егор Сергеевич – аспирант, Липецкий государственный технический университет.

Сдвижков Андрей Витальевич – аспирант, Липецкий государственный технический университет.

References

1. Novikov VA, Savva SV, Tatarintsev NI. Electric drive-in modern technologies: a textbook for university students. M.: Academy, 2014. 400 p.

2. Sinjukov, TV, Sentsov EV. Synthesis of the rotor frequency of the asynchronous rotor,

based on the concept NN. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2019;9:13-20. doi 10.25791/pribor.09.2019.870

3. Kalachev YuN. State observers in a vector electric drive (notes of an amateur). 2015. 60 p.

4. Stanimir Valtchev, Viktor Meshcheryakov, Elena Gracheva, et al. Energy-Saving Control for Asynchronous Motor Motion System Based on Direct Torque Regulator. *Energies* 2023;16(9):3870.

5. Titov SS, Meshcheryakov VN., Leushin IO. Development of technology and equipment for induction axisymmetric hardening of grinding steel balls. *Ferrous metals*. 2020; 6:11-16.

6. Sentsov EV, Meshcheryakov VN. Modeling of a sensorless control system for an electric drive of a furnace roller table using neural network objects. *Electrotechnical systems and complexes*. 2023;1 (58):49-56.

7. Meshcheryakov VN, Danilov VV. Improving the energy efficiency of an asynchronous electric drive with vector control by regulating the longitudinal component of the stator current at partial static load. *Electrical systems and complexes*. 2018;3 (40):4-11.

8. Sinyukova TV, Sentsov EV and Sinyukov AV. *Neural Network Speed Observers*, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 320-324, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484.

9. Himanshu Swami, Amit Kumar Jain. *An Improved Scalar Controlled Drive Based on Steady State Model of Vector Controlled Drive for Squirrel Cage Induction Motor*, 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Kyoto. 2021.pp. 1-5. doi:10.1109/ISIE45552.2021.9576415

10. Alexander Pugachev, Andrey Kosmodamianskiy. *Induction Motor Scalar Control System with Power Losses Minimization*, 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). sochi. 2019.pp. 1-5. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8742951.

11. Kuksin, AV, Romanov AV. Mathematical model of the adaptive-vector control system of a sensorless asynchronous electric drive. *Electrical engineering*. 2009. No. 11.

12. Firago, B.I. Vector control systems for electric drives. Minsk: Higher School, 2016. 159 p.

13. Afanasiev KS. Development of a state observer for an asynchronous electric drive with increased parametric robustness dis... cand. those. Sciences: 05.09.03 / Afanasiev Kirill Sergeevich. Tomsk, 2015. 106 p.

14. Tregubova KA. Review of existing state observers in a vector electric drive / K.A. Tregubova, T.V. Sinyukova. *Automation and informatics. Trends in the development of modern science*. Proceedings of the scientific conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University, 2018. P. 152-154.

15. Zhao Q, Yang Z, Sun X, Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter. *International Journal of Electronics*. 2020;107(9):1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>.

Authors of the publication

Viktor N. Meshcheryakov – Lipetsk State Technical University.

Egor S. Mantukhov – Lipetsk State Technical University.
Lipetsk State Technical University.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
Смежные шифры в рамках группы научной специальности:*

Получено 10.05.2023 г.

Отредактировано 17.05.2023 г.

Принято 29.05.2023 г.



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МОБИЛЬНЫХ ЗАРЯДНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Сафин А.Р., Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Цветков А.Н., Петров Т.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vasiliybas123@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Отсутствие легкодоступных зарядных станций становится негативным фактором роста внедрения электромобилей. Следовательно, планирование и размещение зарядных станций набирает обороты среди исследователей во всем мире. Одним из перспективных решений является использование мобильных зарядных станций, которые могут решить проблему стационарности существующих решений. ЦЕЛЬ. Для подтверждения актуальности исследования и определения современного технического уровня в области зарядных станций для электротранспорта (для сравнения с разрабатываемой технологией на базе Казанского государственного энергетического университета и производственного объединения «Зарница»), произведен анализ патентной информации. МЕТОДЫ. Авторами статьи были определены термины и ключевые слова для анализа, проведен сбор данных на специализированных сайтах и был проведен подробный анализ ряда патентов разных стран, исследовательских организаций. РЕЗУЛЬТАТЫ. Максимальный уровень разработок находится на уровне TRL 3-5, но анализ патентной активности говорит о росте числа объектов интеллектуальной собственности, что может говорить о будущем резком увеличении уровня TRL, и необходимости собственных разработок готовых для серийного производства, для чего авторами разработана блок-схема разрабатываемой мобильной установки заряда электротранспорта, с указанием особенностей: возможность выдавать мощность в сеть, беспроводная зарядка для электротранспорта, наличие всех основных типов зарядок для электромобилей, возможность интеграции возобновляемых источников энергии, динамическое распределение энергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Технический уровень разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта не позволяет говорить о готовых решениях, которые можно использовать для развития зарядной инфраструктуры РФ, и разработка отечественного решения в виде серийного производства необходима.

Ключевые слова: электротранспорт; мобильная зарядная установка; уровень технической готовности; зарядное устройство; зарядная инфраструктура.

Благодарности: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Организация высокотехнологичного производства мобильных установок заряда электротранспорта высокой мощностью с интегрированной системой накопления электроэнергии», Соглашение №075-11-2021-048 с Минобрнауки РФ от 25 июня 2021 г.

Для цитирования: Сафин А.Р., Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Цветков А.Н., Петров Т.И. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.25. № 3. С. 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64.

ANALYSIS OF THE TECHNICAL LEVEL OF DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF MOBILE CHARGING INSTALLATIONS FOR ELECTRIC TRANSPORT

AR. Safin, VR. Basenko, MF. Nizamiev, AN. Tsvetkov, TI. Petrov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. The lack of easily accessible charging stations is becoming a negative factor in the growth of the adoption of electric vehicles. Consequently, the planning and placement of charging stations is gaining momentum among researchers around the world. One

of the promising solutions is the use of mobile charging stations, which can solve the problem of the stationarity of existing solutions. **TARGET.** To confirm the relevance of the study and determine the current technical level in the field of charging stations for electric vehicles (for comparison with the technology being developed on the basis of Kazan State Power Engineering University and the Zarnitsa production association), an analysis of patent information was made. **METHODS.** The authors of the article defined terms and keywords for analysis, collected data on specialized sites and carried out a detailed analysis of a number of patents from different countries, research organizations. **RESULTS.** The maximum level of development is at the level of TRL 3-5, but the analysis of patent activity indicates an increase in the number of intellectual property objects, which may indicate a future sharp increase in the level of TRL, and the need for their own developments ready for mass production, for which the authors developed a flowchart of the developed mobile electric vehicle charging installation, indicating the features: the ability to supply power to the network, wireless charging for electric vehicles, the availability of all major types of charging for electric vehicles, the possibility of integrating renewable energy sources, dynamic energy distribution. **CONCLUSION.** The technical level of developments in the field of mobile charging stations for electric vehicles does not allow talking about ready-made solutions that can be used to develop the charging infrastructure of the Russian Federation, and the development of a domestic solution in the form of mass production is necessary.

Keywords: electric transport; mobile charger, level of technical readiness; Charger; charging infrastructure.

Acknowledgments: The publication of the article was carried out within the framework of the project "Organization of high-tech production of mobile high-power electric transport charge units with an integrated energy storage system", Agreement No. 075-11-2021-048 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated June 25, 2021.

For citation: Safin AR, Basenko VR, Nizamiev MF, Tsvetkov AN, Petrov TI. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging installations for electric transport Study of adaptive control system of asynchronous electric drive belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(3): 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64.

Введение

Сегодня на дорогах все больше электромобилей, которые нуждаются в постоянной подзарядке. Ожидается, что в будущем произойдет дальнейшее значительное увеличение количества электромобилей на дорогах, в воздухе и на воде, т.е. электромобилей, грузовиков, самолетов и лодок. Таким образом, наблюдается тенденция к обезуглероживанию всех видов транспорта [1].

Переход на электромобильный транспорт обязательно требует инфраструктуры зарядных станций. Станции для зарядки электромобилей необходимы для обеспечения дешевой и чистой электроэнергией, производимой сетью и возобновляемыми источниками энергии, что ускоряет внедрение электромобилей [2,3]. Создание новых сетей зарядных станций позволит решить проблемы владельцев электромобилей, и это позволит им конкурировать с двигателями внутреннего сгорания с точки зрения производительности [4]. Для владельцев электромобилей важно наличие всей необходимой инфраструктуры, которая гарантирует успешное завершение поездки без задержек зарядки или с минимальными временными задержками. Поэтому инвесторы ждут, когда на дорогах появится достаточное количество электромобилей, чтобы сделать бизнес по инфраструктуре зарядки прибыльным. Политика правительства также играет важную роль в решении этих проблем [5]. Отсутствие недорогих аккумуляторов, которые могут хранить достаточно энергии в течение более длительного периода времени для увеличения запаса хода электромобилей, является еще одним важным фактором, влияющим на внедрение электромобилей [6,7]. Кроме того, в последние годы важными темами исследований стали оптимальное расположение зарядных станций и влияние электромобилей на систему распределения электроэнергии [8].

Мобильные зарядные станции были описаны в обзорном документе [9], в котором различные стратегии зарядки подразделяются на три основные категории: мобильная зарядка (включая подкатегории: портативная зарядная станция, мобильные зарядные станции для грузовиков и передача энергии от транспортного средства к транспортному

средству (V2V), стационарная зарядка (частные и общественные зарядные станции) и бесконтактная зарядка (замена батареи и беспроводная дорожная зарядка).

Однако в России есть проблема с развитием зарядной инфраструктуры, и решением может стать создание мобильных устройств для зарядки электромобилей [10-13].

В рамках работы проведен патентный поиск для выявления направлений развития устройств в области зарядки электромобилей, и на базе анализа полученной информации доработана блок-схема МУЗЭ, что является новым теоретическим решением. Практическая значимость заключается в создании патентной базы, подтверждающей необходимость в создании отечественного МУЗЭ.

Материалы и методы. Оценка уровней готовности технологий TRL

По результатам патентного поиска были выявлены различные разработчики и технические решения, имеющие назначение, соответствующее регламенту патентного поиска. Особое внимание обращалось на решения, что осуществляют правовую охрану изобретений и полезных моделей, связанных с усовершенствованием зарядной инфраструктуры для электротранспорта и имеющие высокий технический уровень представленного продукта.

Оценка найденных технических решений производилась на базе шкалы уровней готовности технологий NASA – с помощью калькулятора TRL для оценки степени готовности технологий и технических решений. Калькулятор TRL имеет следующую классификацию:

TRL 1 – Утверждение и публикация базовых принципов технологии.

TRL 2 – Формулировка концепции технологии и оценка области применения.

TRL 3 – Начало исследований и разработок. Подтверждение характеристик.

TRL 4 – Проверка основных технологических компонентов в лабораторных условиях.

TRL 5 – Проверка основных технологических компонентов в реальных условиях.

TRL 6 – Испытания модели или прототипа в реальных условиях.

TRL 7 – Демонстрация прототипа (опытного образца) в условиях эксплуатации.

TRL 8 – Окончание разработки и испытание системы в условиях эксплуатации.

TRL 9 – Демонстрация технологии в окончательном виде при летных испытаниях образца.

Анализ разработок в области зарядной инфраструктуры для электротранспорта

Для устройств и решений в области зарядной станции электротранспорта выявлены два патента от разработчиков, а именно: национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», ООО «Ева».

Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» предложена зарядная станция электрического транспорта, содержащая по меньшей мере три зарядных блока, каждый из которых соединен с отдельным модулем накопления энергии, которые последовательно соединены через контроллер заряда и распределения электроэнергии, соединенный через средство контроля и учета электроэнергии с внешней электросетью, с отдельными модулями генерации, выполненными соответственно на солнечных батареях, на по меньшей мере одном ветрогенераторе, на водородных топливных элементах и модуле на привозных топливных элементах, контроллер заряда и распределения соединен с электролизером, который отдельными трубопроводами соединен с резервуаром с водой, и через резервуар с водородом с модулем генерации на водородных топливных элементах, соединенным трубопроводом с резервуаром с водой, модуль генерации на привозном топливе через трубопровод соединен с топливным резервуаром.

ООО «Ева» разработали электростанцию, включающая в себя корпус, а также установленные внутри него программируемый логический контроллер, а также устройство управления процессом заряда электромобиля, устройство защитного отключения с приводом дистанционного автовзвода, датчик угла наклона, модуль связи, внутренний датчик температуры воздуха, датчик относительной влажности воздуха, датчик горючих газов, герконовый датчик, реле напряжения, трансформатор тока и напряжения, модуль измерения параметров электрической сети, реле контроля сопротивления изоляции цепей переменного тока, реле контроля электрических величин и устройство защиты от импульсных перенапряжений и помех, соединенные с контроллером, при этом снаружи корпуса расположен зарядный разъем, бесконтактный терминал оплаты, модуль внешней индикации и внешний датчик температуры воздуха, соединенные с контроллером. Техническим результатом является повышение эффективности предупреждения аварийных ситуаций на электростанциях.

Данные разработки имеют уровень технической готовности TRL 3, так как не имеют подтвержденных лабораторных испытаний о своих технических характеристиках.

Для устройств и решений в области накопителей выявлены патенты от следующих разработчиков: ООО «Малая и распределенная энергетика – инновационные решения», ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет».

ООО «Малая и распределенная энергетика – инновационные решения», представила устройство аккумулирующих источников вторичного электропитания для электроприводов, использующих рекуперацию, а также компенсаторов пусковых токов. Предложена конструкция модуля управления аккумулирующим устройством на базе сборки последовательно соединенных СК и последовательно соединенных АКБ, включающая устройство общего управления, выполненное на микроконтроллере. Предложенное устройство обеспечивает:

- возможность изменения параметров модуля с помощью управляющего устройства на базе микроконтроллера,
- активную дифференциальную балансировку СК и АКБ в сборке с помощью устройства сравнения напряжения на каждой ячейке СК и АКБ с эталонным, и при достижении такого напряжения отключение этой ячейки с помощью коммутирующего устройства.

Реализация полезной модели позволяет повысить энергоэффективность и безопасность накопителей энергии на СК и АКБ и существенно сэкономить циклический ресурс АКБ в системах, применяющих рекуперацию.

Омский государственный университет путей сообщения представляет систему тягового электроснабжения, которая содержит гибридный накопитель электроэнергии на посту секционирования. Предлагаемое устройство позволяет сократить потери электроэнергии в преобразователе и реализовать управление модулями накопителей электроэнергии различного вида при совместной работе в режимах заряда и разряда.

Московский политехнический университет создал гибридный накопитель энергии (ГНЭ) для зарядных станций электротранспорта содержит отсек аккумуляторных батарей, отсек суперконденсаторов и силовой электроники. Отсек аккумуляторных батарей и отсек суперконденсаторов и силовой электроники являются частями одного корпуса. Отсек аккумуляторных батарей и отсек суперконденсаторов и силовой электроники содержат вентиляторы охлаждения. Отсек суперконденсаторов и силовой электроники содержит контур жидкостного охлаждения, подводы для подключения контуров жидкостного охлаждения к охлаждающим плитам. Вентиляторы охлаждения закреплены на корпусе гибридного накопителя энергии, как и контуры жидкостного охлаждения. Технический результат заключается в достижении безотказности ГНЭ за счет охлаждения модуля АКБ и модуля СК, входящими в конструкцию ГНЭ.

Представленные решения находятся на 5 уровне готовности по классификации TRL, так как данные накопители электроэнергии уже имели реальную апробацию своих компонентов, но при этом до сих пор не применяются в совокупности.

Устройства и решения в области заряда электротранспорта представлены от следующих разработчиков: ООО «Энергия», Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

ООО «ЭНЕРГИЯ» представляет зарядное устройство для аккумуляторной батареи. Полезная модель относится к области электротехники, в частности к зарядным устройствам на основе тиристорных регулируемых выпрямителей, используемых для зарядки аккумуляторных батарей. Технический результат заключается в обеспечении гибкости регулирования напряжения и тока в широком диапазоне для зарядки аккумуляторных батарей широкой номенклатуры.

Достигается тем, что зарядное устройство для аккумуляторной батареи, содержащее, по меньшей мере, один регулируемый тиристорный регулятор-выпрямитель напряжения постоянного тока с импульсно-фазовым регулятором, датчики напряжения и тока, один повышающий трансформатор, по меньшей мере, один регулятор напряжения переменного тока, отличается от прототипа тем, что повышающий трансформатор установлен перед регулятором напряжения переменного тока, который представляет собой магнитный усилитель и выход которого, в свою очередь, связан со входом тиристорного регулятора-выпрямителя, при этом управление обмоткой подмагничивания магнитного усилителя осуществляется контроллером, который выполнен также с возможностью управления тиристорным регулятором-выпрямителем напряжения постоянного тока с использованием импульсно-фазового регулятора, выполненного на дискретных элементах с использованием

обратной связи по выходному напряжению и току, измеряемому после фильтра низкочастотных помех.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ предлагает систему управления зарядом аккумуляторных батарей для электротранспорта от стандартного сетевого напряжения. Система управления зарядом аккумуляторных батарей для электротранспорта от стандартного сетевого напряжения для электротранспорта от стандартного сетевого напряжения снабжена аккумуляторами, резисторами, транзисторами, диодами, диодными лампами, стабилитронами, конденсаторами, кнопками, контактами, магнитным пускателем, плавкой вставкой, предохранителями, контактором, соединенными последовательно между собой и разделенными на десять зарядных групп.

Новосибирский государственный технический университет разработал бесконтактное зарядное устройство для электромобиля. Полезная модель относится к зарядной системе и может быть использована для заряда аккумуляторной батареи электромобилей.

Бесконтактное зарядное устройство для электромобилей, содержащее подвижную платформу и излучающую катушку, при этом подвижная платформа имеет шарнирно-сочлененную связь, а излучающая катушка, покрытая экранированным слоем, размещена в раме, рама с излучающей катушкой механически жестко закреплены с подвижной платформой, датчик движения установлен на раме в одной плоскости с излучающей катушкой.

Техническим результатом предлагаемой полезной модели является увеличение КПД за счет сокращения расстояния между излучающей и принимающей катушками. Также данное устройство позволит сократить время заряда транспортного средства.

Решения от данных разработчиков имеют уровень технической готовности TRL 4, потому что они находятся на стадии апробации лабораторных разработок для испытаний способов заряда электромобилей.

Диаграмма уровня готовности (рис. 1), полученной авторами в ходе проведенного анализа, показывает, что найденные решения имеют средний уровень технической готовности на уровне TRL 4, что не является достаточным для дальнейшего развития зарядной инфраструктуры в России.

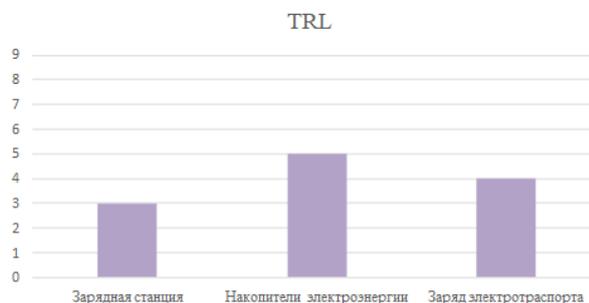


Рис.1 Диаграмма уровня готовности технологий в области зарядных установок для электротранспорта

Fig.1 Diagram of the technology readiness level in the field of charging installations for electric vehicles

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Анализ существующих разработок не выявил решения, которые обладали бы «мобильностью» - возможностью быстрого развертывания зарядной установки для оперативного решения задач поставки электроэнергии для электротранспорта [14].

Мобильная зарядная установка для электротранспорта на базе Казанского государственного энергетического университета

Разрабатываемая мобильная установка заряда электротранспорта (МУЗЭ) ФГБОУ ВО «КГЭУ» позволит значительно повысить уровень технической готовности устройств в данной области в России, и, тем самым, даст возможность к развертыванию зарядной инфраструктуры в России.

Мобильные установки заряда электротранспорта являются уникальным решением для развития и повышения устойчивости системы электротранспорта, в частности электромобилей [15].

Обобщенная блок - схема состава МУЗЭ, разработанная авторами, представлена на рисунке 2, где СН- блок собственных нужд, УИЗ – устройство инверторное зарядное.

Данная схема строения МУЗЭ имеет общий характер и может меняться в зависимости от типа исполнения устройства заряда, общей мощности и задач, решаемых тем или иным устройством.

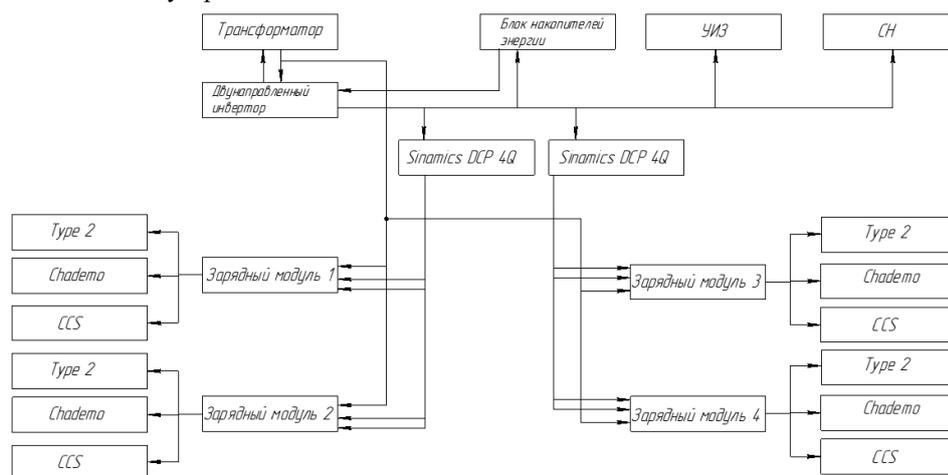


Рис.2 Обобщенная блок - схема состава МУЗЭ

Fig.2 Generalized block diagram of the composition of the MUSE

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Выделим основные особенности разрабатываемой МУЗЭ:

- 1) Возможность не только потреблять мощность из сети, но и выдавать её за счет двунаправленного инвертора.
- 2) Наличие устройства инверторного зарядного, которое позволяет реализовать беспроводную зарядку для электротранспорта.
- 3) Наличие на зарядном посту всех основных типов зарядок для электромобилей.
- 4) Возможность интеграции возобновляемых источников энергии для дополнительного питания.
- 5) Реализация функции динамического распределения энергии между зарядными постами.

Результаты. Анализ патентной активности в области зарядных станций для электротранспорта

Результаты анализа патентной активности показывают, что активный рост динамики патентования зарядных станций для электротранспорта начался с 2014-2015 годов и практически без существенных спадов растет вверх. Из авторского рисунка 3 видно, что количество охранных документов за 17 летний период (1997-2013 гг.) составляют 37 патентов, а за 9-летний период (2014-2022 гг.) – 118. А на основе тренда экспоненциального приближения на 5 лет (коэффициент детерминации 0,79) можно говорить о том, что динамика патентования зарядных станций для электротранспорта будет стремительно развиваться, и достигнет максимального значения в 2027 году в 43 охранных документа.

Растущее внедрение электромобилей с учетом экологических требований является основным фактором тенденции развития новых технологий в области зарядных электростанций.

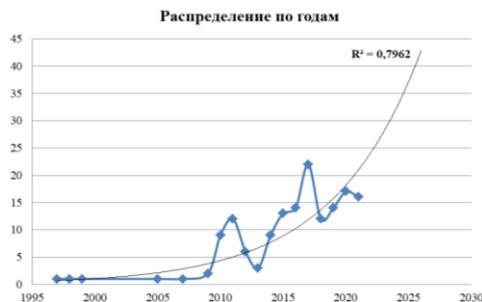


Рис.3 Результаты анализа патентной активности по годам для ключевого слова «Electric Vehicle Charging Station»

Fig.3 Results of the analysis of patent activity by years for the keyword «Electric Vehicle Charging Station»

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты анализа патентной активности показывают, что активный рост динамики патентования систем накопления электроэнергии начался с 2018 года и практически без существенных спадов растет вверх. Из авторского рисунка 4 видно, что количество охранных документов за 10 летний период (2008-2017 гг.) составляют 42 патента, а за 5-летний период (2018-2022) – 114. Основной пик приходится на 2019 год, когда было зарегистрировано 38 охранных документов, а на основе тренда можно говорить о возвращении числа патентов до 35 единиц к 2025 году. Рост динамики связан с активным внедрением портативных мобильных зарядных станций, которые включают в себя мобильную аккумуляторную систему накопления энергии, которая буксируется или переносится транспортным средством, что обеспечивает автономную работу зарядной станции.



Рис.4 Результаты анализа патентной активности по годам для ключевого слова "Energy Storage System" *Fig.4 Results of the analysis of patent activity by years for the keyword «Energy Storage System»*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты анализа патентной активности показывают, что активный рост динамики патентования беспроводной система передачи электроэнергии для электротранспорта начался с 2017 года и практически без существенных спадов рос вверх до 2021 года, но на основе анализа тренда можно говорить о существенном увеличении патентов (40 единиц) к 2027 году. Из авторского рисунка 5 видно, что количество охранных документов за 6 летний период (2011-2016 гг.) составляет 12 патентов, а за тот же период 2017-2022 гг. – 64. Основной пик приходится на 2020 год, когда было зарегистрировано 19 охранных документов. Рост динамики связан с активным внедрением беспроводной зарядки (БПЭ), которая не требует прямого электрического соединения между электромобилями и зарядными устройствами. БПЭ является предметом многих исследований из-за его удобства и безопасности.

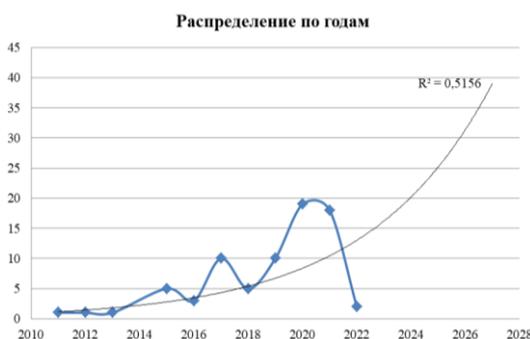


Рис.5 Результаты анализа патентной активности по годам для ключевого слова «Wireless Power Transmission Systems» *Fig.5 Results of the analysis of patent activity over the years for the keyword "Wireless Power Transmission Systems"*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты анализа патентной активности по годам для зарядных станций для электротранспорта, систем накопления электроэнергии, беспроводных систем передачи электроэнергии показывают, что активный рост динамики патентования начался с 2015 года. Так от общего числа охранных документов в процентном соотношении патентов до 2015 года – 23%, а после – 77%. Наибольшую динамику показывают системы накопления

электроэнергии для зарядных станций и беспроводные системы передачи электроэнергии электротранспорту. Это говорит о том, что данные технологии на ближайшее время являются наиболее перспективными и востребованными для зарядных станций для электротранспорта.

В настоящее время для успешного продвижения продукции на рынке мало выпускать качественную продукцию на своих предприятиях. Чтобы продукция была конкурентоспособна необходимо иметь как можно более полную информацию о фирмах-производителях данной продукции, об их научной и производительной базах, о состоянии на этих фирмах патентно-лицензионной деятельности, о существующей на предприятиях научно-технической политики.

Знание всего спектра составляющих не только производственной, но и научной деятельности фирм конкурентов позволит более своевременно реагировать на изменения конъюнктуры рынка, тенденций развития продукции, на постоянно меняющийся спрос.

Заключение

Мобильные зарядные устройства для электромобилей — это уникальное решение для развития и устойчивости системы электротранспорта, в частности электромобилей. По сравнению с источниками литературного обзора, представлена оригинальная схема МУЗЭ отечественного производства, у которой существуют уникальные особенности.

По результатам патентного поиска были выявлены различные разработчики и технические решения, имеющие назначение, соответствующее регламенту патентного поиска, и связанных с созданием или модернизацией отдельных частей электромобильной зарядной инфраструктуры, и при этом с высоким техническим уровнем.

Технические решения разработчиков в области зарядной имеют уровень технической готовности TRL 4, потому что они находятся на стадии апробации лабораторных разработок для испытаний способов заряда электромобилей, что не является достаточным для дальнейшего развития зарядной инфраструктуры в России. Сегодня нет отечественных зарядных станций, которые могли бы обеспечить гибкость, мобильность, обеспечить зарядку различных потребителей, и все решения частично удовлетворяют тем задачам, которые сегодня ставятся перед зарядной инфраструктурой.

Разработанная мобильная зарядная установка для электромобилей ФГБОУ ВО «КГЭУ» и ООО ПО «Зарница» значительно повысит уровень технической готовности устройств в этой сфере в России и, тем самым, позволит активнее развивать не только зарядную инфраструктуру, но и в перспективе стать базой для разработок в области накопителей энергии для регулирования частоты энергосистемы, и зарядных установок для беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Gray N., McDonagh S., O'Shea R., et.al. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors // *Adv. Appl. Energy* 2021, 1, 100008.
2. Alhazmi Y.A., Mostafa H.A., Salama M.M.A. Optimal allocation for electric vehicle charging stations using trip success ratio // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 91 (2017), pp. 101-116.
3. Sathaye N., Kelley S. An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors // *Transp. Res. Part E*, 59 (2013), pp. 15-33.
4. Clemente M., Fanti M.P., Ukovich W. Smart management of electric vehicles charging operations: The vehicle-to-charging station assignment problem // *IFAC Proc. Vol.*, 47 (3) (2014), pp. 918-923.
5. Wolbertus R., Jansen S., Kroesen M. Stakeholders perspectives on future electric vehicle charging infrastructure developments // *Futures*, 123 (2020), Article 102610.
6. Benysek G., Jarnut M. Electric vehicle charging infrastructure in Poland // *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (1) (2012), pp. 320-328.
7. Ghosh A. Possibilities and challenges for the inclusion of the electric vehicle (EV) to reduce the carbon footprint in the transport sector. A review // *Energies*, 13 (10) (2020), p. 2602
8. Lam A.Y.S., Leung Y.-W., Chu X. Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions // *IEEE Trans. Smart Grid*, 5 (6) (2014), pp. 2846-2856
9. Afshar S., Macedo P., Mohamed F. and Disfani V. Mobile charging stations for electric vehicles. A review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 152, 111654.
10. Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Петров Т.И., Басенко В.Р., Манахов В.А. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2021. Т. 23. № 5. С. 100-114.
11. Cui S., Zhao H., Wen H., and C. Zhang. Locating multiple size and multiple type of

- charging station for battery electricity vehicles // *Sustainability*. 2018. V. 10. no. 9. p. 3267
12. Bruninga R. Overlooking II charging at-work in the rush for public charging speed // *IEEE International Electric Vehicle Conference*. IEEE, 2012, pp. 1–5.
13. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутривозового электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 93-104. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104. – EDN DSIMFU.
14. Rajper S.Z., Albrecht J. Prospects of Electric Vehicles in the Developing Countries: A Literature Review // *Sustainability* 2020, 12, 1906.
15. Yu, M.; Hynan, P.; von Jouanne, A.; Yokochi, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements // *Energies* 2019, 12, 1074.
16. Wang L., Qin Z., Slangen T., et.al. Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures—An Overview // *IEEE Open J. Power Electron*. 2021, 2, 56–74.

Авторы публикации

Сафин Альфред Робертович - д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gray N., McDonagh S., O’Shea R., et.al. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Adv. Appl. Energy* 2021;1: 100008.
2. Alhazmi Y.A., Mostafa H.A., Salama M.M.A. Optimal allocation for electric vehicle charging stations using trip success ratio. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2017;91:101-116.
3. Sathaye N., Kelley S. An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors. *Transp. Res. Part E*. 2013;59:15-33.
4. Clemente M., Fanti M.P., Ukovich W. Smart management of electric vehicles charging operations: The vehicle-to-charging station assignment problem. *IFAC Proc.* 2014;47(3):918-923.
5. Wolbertus R., Jansen S., Kroesen M. Stakeholders perspectives on future electric vehicle charging infrastructure development. *Futures*. 2020;123:102610.
6. Benysek G., Jarnut M. Electric vehicle charging infrastructure in Poland. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012;16(1):320-328.
7. Ghosh A. Possibilities and challenges for the inclusion of the electric vehicle (EV) to reduce the carbon footprint in the transport sector. A review. *Energies*. 2020;13(10):2602.
8. Lam A.Y.S., Leung Y.-W., Chu X. Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2014;5(6):2846-2856.
9. Afshar S., Macedo P., Mohamed F. and Disfani V. Mobile charging stations for electric vehicles. A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021;152:111654.
10. Safin A.R., Ivshin I.V., Cvetkov A.N., Petrov T.I., Basenko V.R., Manahov V.A. Development of technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23;5:100-114.
11. Cui S., Zhao H., Wen H., and C. Zhang. Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles. *Sustainability*. 2018;10;9:3267
12. Bruninga R. Overlooking II charging at-work in the rush for public charging speed. *IEEE International Electric Vehicle Conference*. 2012:1–5.
13. Gracheva E. I., Naumov O. V., Gorlov A. N., Shakurova Z. M. Algorithms and probabilistic models of the parameters of functioning of intraplant power supply. *Energy*

problems. - 2021. - T. 23, No. 1. - S. 93-104. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104. - EDN DSIMFU.

14. Rajper S.Z., Albrecht J. Prospects of Electric Vehicles in the Developing Countries: A Literature Review. *Sustainability*. 2020;12:1906.

15. Yu, M.; Hynan, P.; von Jouanne, A.; Yokochi, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies* 2019;12:1074.

16. Wang L., Qin Z., Slangen T., et.al. Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures—An Overview. *IEEE Open J. Power Electron*. 2021;2:56–74.

Authors of the publication

Alfred R. Safin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasily R. Basenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Nizamiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexey N. Tsvetkov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Получено 26.06.2023 г.

Отредактировано 03.07.2023 г.

Принято 05.07.2023 г.



**INFLUENCE OF THE TYPE OF LOAD GRAPHS ON THE SERVICE LIFE
TRANSFORMERS 33/11 KV AT SUBSTATION "KABUN-1"
(SYRIAN ARAB REPUBLIC)**

E.Yu. Abdullazyanov¹, E.I. Gracheva², A. Alzakkar³, S. Valtchev⁴, N. Mestnikov⁵

^{1,2,3}**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

⁴**UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal**

⁵**North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia**

²<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com

Abstract: Power transformers are one of the main components of power supply systems needed to reliably supply electricity to consumers. As we know, the value of the allowable load of transformers is determined by the value of the allowable heating of structural elements, on which the service life of transformer period depends. Reliable data on the technical condition of the structural elements of transformers is the decisive information for making decisions on the replacement and maintenance of transformers. **METHODS.** To assess the service life of transformers, methods were used to evaluate the statistical parameters of consumer load graphs, load factors and the heating temperature of the windings of transformers with a capacity of $S_{n.T} = 20$ MVA, a voltage of 33/11 kV at substation Kabun-1. **THE AIM.** The aim of the work is to evaluate the service life of the transformers at substation Kabun-1 (Syrian Arab Republic) with various options for the type of load power consumption graph (first; second; third). **THE RESULTS.** The main statistical parameters of the characteristics of the original and proposed options of load power graphs (active, reactive and apparent) per day of transformers, the main electrical consumer of which is the spinning and weaving factory, are determined. Approximating functions of daily graphs of power loads of transformers, from which the spinning and weaving factory receives power (first and second approximations), have been developed. It is proved that with the considered options for shifting the time of the start of work of electrical consumers - with the third option -the maximum load power is reduced by 12.8%, load variation is reduced from 0.33 to 0.17 in relation to the second option for the subdivisions of the spinning and weaving factory. It has been established that for all the considered options, the average value of the load power of the transformers at substation Kabun-1 is constant. The laws of change in the relative value of the service life of transformers during the implementation of various technical measures are determined.

Key words: power consumer, power transformer, load graph, transformer load factor, winding heating, service life.

For citation: EYu. Abdullazyanov, EI. Gracheva, A. Alzakkar, S. Valtchev, N. Mestnikov. Influence of the type of load graphs on the service life transformers 33/11 Kv at substation "Kabun-1" (Syrian Arab Republic). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (3): 65-80. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-65-80.

**ВЛИЯНИЕ ВИДА ГРАФИКОВ НАГРУЗОК НА СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 33/11 КВ ПОДСТАНЦИИ «КАБУН-1»
(СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА)**

Абдуллазянов Э.Ю.¹, Грачева Е.И.², Альзаккар А.³, Valtchev S.⁴, Местников Н. П.⁵

^{1,2,3}**Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия**

⁴**UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal**

⁵**Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
г. Якутск, Россия**

Резюме: Силовые трансформаторы являются одними из основных элементов систем электроснабжения, необходимых для надёжного обеспечения потребителей электроэнергией. Как известно, величина допустимой нагрузки трансформаторов определяется значением допустимого нагрева элементов конструкции, от которого зависит период срока службы. Достоверные данные о техническом состоянии элементов конструкции трансформаторов являются определяющей информацией для принятия решений по замене и обслуживанию трансформаторов. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является оценка срока службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) при различных вариантах вида графика потребляемой мощности нагрузки (исходный; первой; второй; третий). **МЕТОДЫ.** Для оценки срока службы трансформаторов использованы методы оценки статистических параметров графиков нагрузок потребителей, коэффициентов загрузки и температуры нагрева обмоток трансформаторов мощностью $S_{ном.тр} = 20$ МВА, напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1». **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Определены основные статистические параметры характеристик исходных и предлагаемых вариантов графиков мощности нагрузки (активной, реактивной и полной) за сутки трансформаторов, основным электропотребителем которых является Прядильно-ткацкая фабрика. Разработаны аппроксимирующие функции суточных графиков мощностей нагрузок трансформаторов, от которых получает питание Прядильно-ткацкая фабрика (первое и второе приближение). Доказано, что при рассматриваемых вариантах сдвига времени начала работы электропотребителей - при третьем - наибольшая мощность нагрузки снижается на 12,8%, вариация нагрузок снижается с 0,33 до 0,17 по отношению ко второму варианту для подразделений Прядильно-ткацкой фабрики. Установлено, что для всех рассматриваемых вариантов среднее значение мощности нагрузок трансформаторов подстанции «Кабун-1» постоянно. Определены законы изменения относительного значения срока службы трансформаторов при внедрении различных технических мероприятий.

Ключевые слова: электропотребитель, силовой трансформатор, график нагрузки, коэффициент загрузки трансформатора, нагревание обмоток, срок службы.

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Valtchev S., Местников Н.П. Влияние вида графиков нагрузок на срок эксплуатации трансформаторов напряжением 33/11 Кв подстанции «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 65-80. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-65-80.

Introduction (Введение)

In the current conditions of development of the Syrian Arab Republic, special attention is paid to improving the quality of power supply to the industrial city Adra, which is one of the largest in the Republic. In 2022, new industrial enterprises were put into operation in the city Adra, where there are 31 enterprises, including food factory, engineering and chemical enterprises, whose products on the local market account for more than 60%. At present, considerable attention is paid to the regulation of electricity consumption modes due to the increase in the cost of electricity. Below is an analysis of some of the scientific works of scientists conducting research in this field.

The authors E. Yu. Abdullazyanov, E. I. Gracheva, A. Alzakkar [1] presented a study that makes it possible to increase the reliability of predicting the magnitude of power consumption and power losses at industrial enterprises. At the same time, it is proposed to use the dynamics of changes in the value of the equivalent resistance of intra-factory power supply networks, which will make it possible to control the modes of electricity consumption and make adjustments to the forecasting processes.

A. Naderian, P. Pattabi, L. Lamarre [2] presented an updated estimate of the residual life of transformers based on the results of an improved dynamic model.

K. Chitnavis, N. R. Bhasme [3] developed a power transformer life evaluation method, i.e. a method for calculating the actual serviceability index, including additional factors such as preload, bushing condition, aging, physical measurements of DGA, oil quality, power factor.

K.T. Muthanna, A. Sarkar; K. Das, K. Waldner [4] presented new methods for assessing the life of the insulation of high-power generator units in power plants. This paper shows modeling methods for estimating load factors and ambient temperature, taking into account preliminary operating conditions.

A. Alzakkar, E. Gracheva, Y. Samofalov [5, 6] conducted a study of the calculated power loads of communal electrical consumers and compared with the experimental power consumption in Adra city. Parameters and graphs of loads of electricity consumers at the facilities of the city of Adra were determined by methods of statistical data processing.

D.K. Yakubova [7] considers the effect of load modes on the wear of the insulation of power transformers using the example TENTS-000/220 1000-UHL.

V. A. Anishchenko, V. V. Ivanov [8] developed a method for determining the permissible duration of a systematic non-emergency overload of a distribution oil transformer, taking into account changes in the overload coefficient over the time interval of its operation and, accordingly, changes in the thermal state of the transformer structural elements.

A. Chatterjee, N. K. Roy [9] presented an analysis and simulation of the characteristics of dissolved gases in transformer oil in order to develop an oil change and filtration graph, which in turn regulates the quality of the oil when a failure occurs.

E.I. Gracheva, O.V. Naumov, E.A. Fedotov [10] calculated the operating mode of power transformers to determine the optimal load at which the efficiency of the transformer reaches its maximum value, and also proposed options for increasing the efficiency of power transformers of industrial enterprises.

D. S. Serebrennikov, V. G. Goldshtein [11] explore topical issues of assessing the actual state of power transformers with a significant service life using thermal imaging diagnostics.

The scientific and practical significance of the proposed article is the results of the studies that show that in conditions of high temperatures in the summer in Syria, which can reach 48 ° C, it is necessary to control the change in the load factors of transformers and the heating temperature of the windings, which are the determining factors in changing the relative service life of power transformers. This is especially important at the present time in connection with the imposition of economic sanctions by unfriendly states against the Syrian Arab Republic.

The difference between the presented work and the results of other studies is that for the first time the operating conditions of transformers with a voltage 33/11 kV (substation "Kabun-1", Syria) were studied on the basis of statistical data on power consumption by industrial and non-industrial facilities. The dependences of the change in load factors and the heating temperature of the windings are determined, and recommendations are made for technical solutions aimed at increasing the relative service life of transformers.

Materials and methods (Материалы и методы).

To select the type of approximating function for daily graphs of active power loads of transformers of a spinning and weaving factory we perform a two-stage approximation

A - First approximation.

To study the characteristics of the load graphs under consideration and the choice of approximating functions, we use the results of estimating the parameters of electrical consumers of the spinning and weaving factory, which is powered by substation Kabun-1, given in [5, 6]. The average value of the approximating function must be equal to the average value of the original graph. The maximum value of the approximating function should approach the maximum value of the original graph and approximately coincide in time. Therefore, the form of the function approximating the graph of the active load in the first approximation can be represented as [12, 13]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{[1]}(t) &= B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(\omega^{[1]}t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T^{[1]}}\right) \\ B_p^{[1]} &\approx M_p^{[1]}(+)\approx M_p^{[1]}(-) \\ \omega^{[1]} &= \frac{2\pi}{T^{[1]}} = \frac{6}{24} \approx 0,25 [1/h] \end{aligned} \right\} (1)$$

$M_p = P_{av}$ — is the average value per day of the original active load graph, obtained from statistical data;

$M_p^{[1]}$ — is the daily average value of the active load approximation graph in the first approximation;

$A_p^{[1]}$ — is the amplitude of the cosine can be approximately determined by the expression:

$$\left. \begin{aligned} A_p^{[1]} &\approx A_p \\ A_p &= 0,5(P_{\max} - P_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

P_{\max} и P_{\min} — respectively, are the maximum and minimum value of the daily graph of the active load;

Table 1 shows the total and average values of the original daily graphs of active power loads for 36 transformers of the spinning and weaving factory.

Table 1

Statistical values of the original daily graphs of active power loads of transformers

	M_p , kW	P_{\max} , kW	P_{\min} , kW	$0,5(P_{\max} - P_{\min})$; kW	Φ , kW	(K_{\max}
Sum	14517	26730	4634	11048	7279	18,17	66.45
Average	403	743	129	307	202	0.51	1.85

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 2 shows:

1. Arguments of approximating functions of daily active loads of transformers in the first approximation with a period $T^{[1]} = 24$ h and frequency $T \approx 0.25$ 1/h.

$$\Phi^{[1]}(t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(0.25t) \quad (3)$$

2. Mean values of differences:

$$\left. \begin{aligned} M_R^{[1]} &[f_{\text{orig}}(t) - \Phi^{[1]}(t)] \\ M_R^{[1]} \% &= \frac{M_R^{[1]}}{M_p^{[1]}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3. The value of the standard deviation of the differences:

$$\left. \begin{aligned} \delta_R^{[1]} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} ((M_R^{[1]})_i - (M_R^{[1]})_{\text{av}})^2}{24}} \\ \delta_R^{[1]} \% &= \frac{\delta_R^{[1]}}{M_p^{[1]}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Table 2

Arguments and estimation of the error of the approximation function (first approximation) $B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(0.25t)$ of daily graphs of active power of loads of 36 transformers

	Arguments function $N^{[1]}(t)$ approximations in the first approximation		$M_R^{[1]}$	$*_R^{[1]}$
	$B_p^{[1]}$	$A_p^{[1]}$		
Sum (kW)	14090	10480	62	4362

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

The data in table 2 show that the average values of the differences between the original graph and the approximating function are fractions of a percent of the average value of the active load per day for all transformers. Fig.1 shows the original graph of the active load of the transformer 25 (with the highest value of the load factor $K_L = 0.98$) and their function approximation.

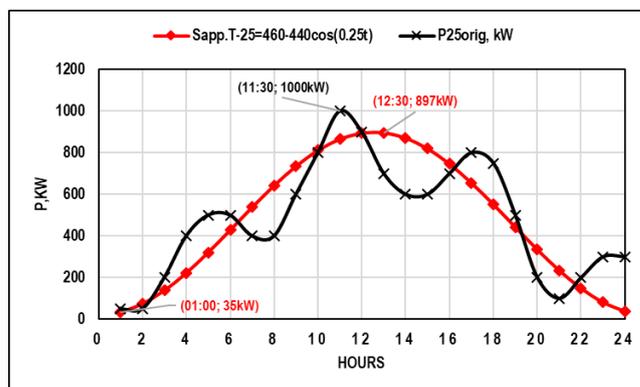


Fig.1. The original graph of the active load T-25 and its function approximation $460-440\cos(0.25t)$

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.1 shows that the maximum time of the original graph is 11:30 am and the maximum time of the function approximation is 12:30 pm. Values of root mean square error for loads (28) of transformers exceed 20%, which indicates the need for a more accurate approximation. Table 3 shows the statistical characteristics of the approximated graphs of the active load of 36 transformers.

Table 3

The values of the statistical data of the daily graphs and approximation functions of the active power of the loads of transformers with a voltage of 11/0.4 kV of the spinning and weaving factory (first approximation)

	$M_p^{[1]}$, kW	P_{max} , kW	P_{min} , kW	Φ , kW	(K_{max}
Sum	14579	24310	4126	7232	17,85	59,98
Average	405	675	115	201	0,49	1,67

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 4 presents the characteristics of the original total graphs of the active load of the spinning and weaving factory and the sum of the approximating functions of the transformers.

Table 4

Statistical parameters of the original graphs and approximated (first approximation $14090-10480\cos(0.25t)$) total daily graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory.

Graph	ΣM_p , kW	ΣP_{max} , kW	ΣP_{min} , kW	$\Sigma \Phi$, kW	(_{av}	$(K_{max})_{av}$
Original	14517	26730	4634	7279	0,51	1,85
Approximate	14579	24310	4126	7232	0,49	1,67

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Expression (2) determines the function of approximation of the total load graph of the factory.

$$B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(0,25 t) = 14090 - 10480 \cos(0,25 t) \quad (6)$$

Fig.2 shows the total graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory of the original and approximated ones.

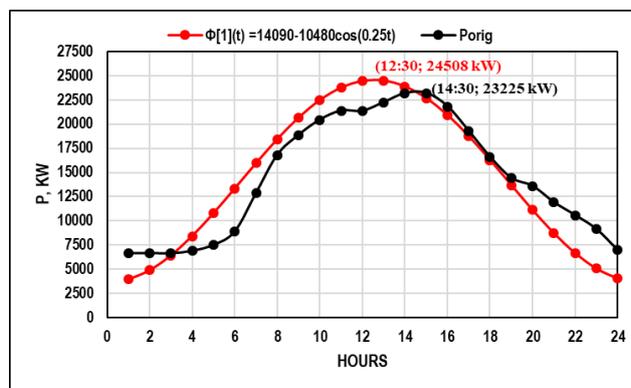


Fig.2. The total active power graphs of the loads of the spinning and weaving factory of the original and approximated $\Phi^{[1]}(t) = 14090 - 10480 \cos(0.25t)$.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

The data in table 4 and Fig. 2 show that with the practical coincidence of the average values of the load power graphs, there is a significant difference in the minimum and maximum values. The maximum load of the original graph is observed at 14:30, and the approximated one - at 12:30, so the approximation needs to be refined.

B- Second approximation.

To approximate the daily graphs of the active load of transformers in the second approximation, the sum of harmonic functions was used:

1. The first one with the period $T_1^{[2]} = 20$ ч или 24 ч ($\omega_1^{[2]} = 0.25$ и 0.33);
2. The second one with the period $T_2^{[2]} \approx 6$ ч ($\omega_2^{[2]} = 1$).

For a more accurate approximation of the maximum load time in the original graph to the time of the maximum of the approximation function, various initial phases were selected.

$$j_0^{[2]} = 2\pi \cdot t_0 \omega^{[2]} \quad (5)$$

Therefore, the form of the function approximating the graph of the active load in the second approximation.

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{[2]}(t) &= B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) \pm A_{P2}^{[2]} \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}) \\ \Phi^{[2]}(t) &= \underbrace{B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_1^{[2]}} + j_{01}^{[2]}\right)}_{\text{First Function}} \pm \underbrace{A_{P2}^{[2]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_2^{[2]}} + j_{02}^{[2]}\right)}_{\text{Second Function}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Let's find the approximation of the function in the second approximation for the transformer 25 using (8):

$$\begin{aligned} 1. \text{ First function } & \left(B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) \right): \\ & \left. \begin{aligned} (B_{P1}^{[2]})_{T-25} & \approx (M_{P,1}^{[2]})_{T-25} = 480 \text{ kW} \\ (A_{P1}^{[2]})_{T-25} & = \frac{P_{\max,1}^{[2]} - P_{\min,1}^{[2]}}{2} = \frac{800 - 200}{2} = 300 \text{ kW} \end{aligned} \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Second function } & \left(A_{P2}^{[2]} \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}) \right): \\ & (A_{P2}^{[2]})_{T-25} = (P_{\min}^{[2]})_{T-25} = 235 \text{ kW} \quad (9) \end{aligned}$$

3. The total approximation of the function in the second approximation for the transformer T-25:

$$\left. \begin{aligned} [\Phi^{[2]}(t)]_{T-25} &= \underbrace{480 - 300 \cos\left(\frac{2\pi t}{24} + 0\right)}_{\text{First Function}} - \underbrace{235 \cos\left(\frac{2\pi t}{6} - 8\right)}_{\text{Second Function}} \\ [\Phi^{[2]}(t)]_{T-25} &= 480 - 300 \cos(0.25t) - 235 \cos(t - 8) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Fig.3 shows 4 graphs, first, second, total approximation of the function and the original for the transformer T-25:

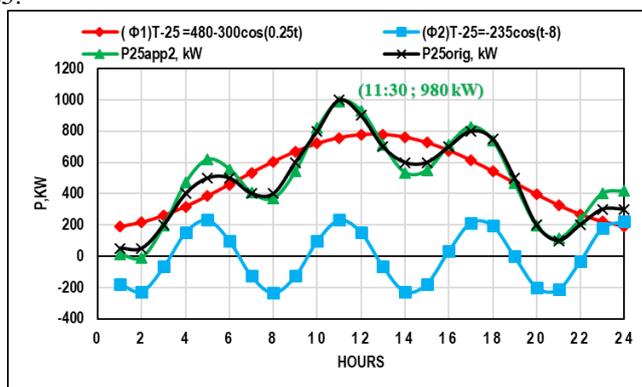


Fig.3. Graphs of the original and functions of the refined approximation of the active load T-25.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.3 shows the agreement between the original and approximated graphs, especially during the maximum (11:30; 980 kW).

Table 5 and 6 show the statistical indicators of the original graphs (average and total) of the active load and approximation functions in the second approximation.

Table 5

Statistical indicators of the original graphs of active load and approximation functions in the second approximation (part-1)

	M _p , kW		P _{max} , kW		Φ, kW	
	Original	Second approximation	Original	Second approximation	Original	Second approximation
Average	403	403	743	743	202	201
Sum	14517	14513	26730	26754	7279	7227

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 6

Statistical indicators of the original active load graphs and approximation functions in the second approximation (part-2)

	P _{min} , кВт		(K _{max}	
	Original	Second Approximation	Original	Second Approximation	Original	Second Approximation
Average	128	61	0.51	0.51	1.84	1.86
Sum	4634	2162	18.17	18.13	66.45	66.60

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Let's calculate the errors for the second approximation of the graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory (for transformer 25):

1. Approximation function.

$$\Phi^{[2]}(t) = 480 - 300 \cos(0.25t) - 235 \cos(t - 8) \quad (11)$$

2. Average values of differences (Fig. 3).

$$\left. \begin{aligned} M_R^{[2]} [f_{orig}(t) - \Phi^{[2]}(t)] &= \frac{16}{24} \approx 0.66 \\ M_R^{[2]} \% &= \frac{0.66}{483} \times 100 = 0.14\% \end{aligned} \right\} (12)$$

3. The value of the standard deviation of the differences.

$$\left. \begin{aligned} \delta_R^{[2]} &= \sqrt{\frac{65599}{24}} = 52.28 \\ \delta_R^{[2]} \% &= \frac{52.28}{483} \times 100 = 11\% \end{aligned} \right\} (13)$$

Table 7 presents comparisons of the error for the first and second approximation of the graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory.

Table 7

Approximation error values (first and second approximation) on average for transformers of the spinning and weaving factory

Graph type	Average difference		Average difference		Root mean square error		Root mean square error	
	M _R ^[2] кВт	M _R ^[1] кВт	M _R ^[2] %	M _R ^[1] %	* _R ^[2] кВт	* _R ^[1] кВт	* _R ^[2] %	* _R ^[1] %
Average	-0.13	2	-0.03	0.418	67.67	121	17.18	30

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 8 presents a comparison of the values of the original and (first, second) approximation daily graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory.

Table 8

Statistical parameters of the original graphs and approximation functions, the first approximation (14090-10480cos(0.25t)) and the second approximation of the daily graphs of the active power of the loads of the spinning and weaving factory

Graph	ΣM _p , kW	ΣP _{min} , kW	Time maximum	ΣP _{min} , kW	ΣΦ, kW	(_{av})	(K _{max}) _{av}
Original	14517	26730	14:30	4634	7279	0.51	1.85
Approximate (1)	14579	24310	12:30	4126	7232	0.49	1.67
Approximate (2)	14513	26754	14:30	2712	7227	0.51	1.86

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

It is noted that for second approximation a fairly accurate degree of coincidence of the graphs is shown by the statistical data in tables 5 and 6; time error estimates and maximum values are shown in tables 7 and 8 (14h:30min; 26750 kW).

The discussion and results (Обсуждение и результаты).

The possible ways to align the load graphs [14, 15] of the spinning and weaving factory

1. The shift in the start time of the weaving production from 5:30 to 12:30, the rest of the production works in the original modes (first option).

2. The shift in the start time of the weaving production from 5:30 to 12:30 and the spinning production from 5:30 to 22:30, the rest of the consumers work in their original modes (second option).

A. First and second options.

In tables 9, 10 and 11 show the calculations of the parameters of the approximate graphs of the total power of the loads for the original, first and second options.

Table 9

Approximate values of the total power of the loads of electrical consumers at substation Kabun-1, taking into account reactive power compensation at the spinning and weaving factory.

	$S_{com}: 15-7\cos(0.5t+5)$	$S_{weav}: 5.7-3.5\cos(0.25t)$	$S_{spin}: 6.6-3.8\cos(0.25t)$	$S_{other}: 2.1-1.9\cos(0.25t)$	$S_{sum.a} PP$	$S_{sum.Kabun-1.orig.comp}$
S_{av}, MVA	14.99	5.86	6.77	2.18	29.81	28.93
S_{max}, MVA	22	9.19	10.39	3.99	42.69	42
K_{fill}	0.68	0.64	0.65	0.55	0.70	0.69
S_{eff}, MVA	22.36	8.96	7.28	2.57	30.88	30.46
Φ_S, MVA	7.13	3.41	2.69	1.34	8.41	9.53
$(s$	0.48	0.58	0.40	0.61	0.28	0.33

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 10

Approximate values of the loads of electrical consumers at substation "Kabun-1" (Option 1), the start time of the weaving production is 12:30

	$S_{com}: 15-7\cos(0.5t+5)$	$S_{weav}: 5.7-3.5\cos(0.25t-8)$	$S_{spin}: 6.6-3.8\cos(0.25t)$	$S_{other}: 2.1-1.9\cos(0.25t)$	$S_{sum.app.opt.1}$
S_{av}, MVA	14.99	5.65	6.77	2.18	29.6
S_{max}, MVA	22	9.18	10.39	3.99	37.4
K_{fill}	0.68	0.62	0.65	0.55	0.79
S_{eff}, MVA	22.36	6.19	7.28	2.57	30.29
Φ_S, MVA	7.13	2.56	2.69	1.34	6.92
$(s$	0.48	0.46	0.40	0.61	0.23

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 11

Approximate values of loads of electrical consumers of substation "Kabun-1" (Option 2), start time of weaving production 12:30 and spinning production 22:30

	$S_{com}: 15-7\cos(0.5t+5)$	$S_{weav}: 5.7-3.5\cos(0.25t-8)$	$S_{spin}: 6.6-3.8\cos(0.25t+2)$	$S_{other}: 2.1-1.9\cos(0.25t)$	$S_{sum.app.opt.2}$
S_{av}, MVA	14.99	5.65	6.55	2.18	29.38
S_{max}, MVA	22	9.18	10.39	3.99	36.36
K_{fill}	0.68	0.62	0.63	0.55	0.81
S_{eff}, MVA	22.36	6.19	7.15	2.57	29.74
Φ_S, MVA	7.13	2.56	2.81	1.34	5.15
$(s$	0.48	0.46	0.43	0.61	0.18

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Using table 6, the total capacity of the spinning and weaving factory at the substation "Kabun-1" for the second option:

$$S_{sum.Kabun-1.fact.opt.2} = S_{sum.fact} + S_{com.orig} \quad (14)$$

All calculated values are presented in table 12.

Table 12

The values of the total power of loads of electrical consumers of transformers 33/11 kV at substation "Kabun-1", a spinning and weaving factory, with a shift in the start time (option 2) and compensation of reactive power of domestic consumers.

	$S_{sum.Kabun-1.orig.comp}$	$S_{sum.fact}$	$S_{com.orig}$	$S_{sum.Kabun-1.fact.opt.2}$
S_{av}, MVA	28.93	14.39	14.46	28.85
S_{max}, MVA	42	14.59	23	37.47
K_{fill}	0.69	0.99	0.63	0.77
S_{eff}, MVA	30.46	14.39	21.90	29.46
Φ_S, MVA	9.53	0.13	7.85	5.62
$(s$	0.33	0.01	0.54	0.19

Fig. 4, 5, and 6 show the graphs of the loads of transformers with a voltage 33/11 kV at substation Kabun-1 and their terms - in real and approximate form - for various cases of the time when the production of the spinning and weaving factory began to work.

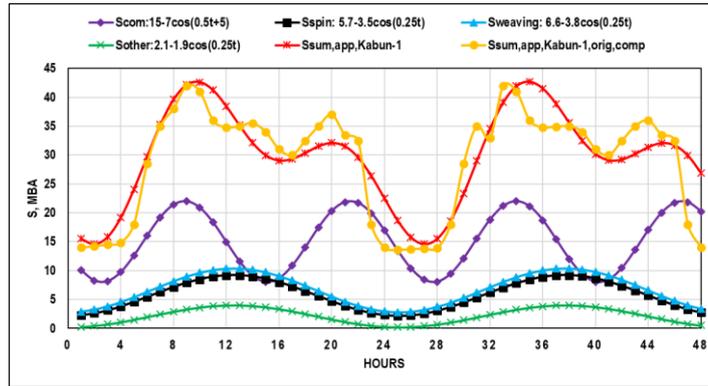


Fig. 4. Approximate graphs of the total power loads of electrical consumers at substation Kabun-1, taking into account reactive power compensation at the spinning and weaving factory.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

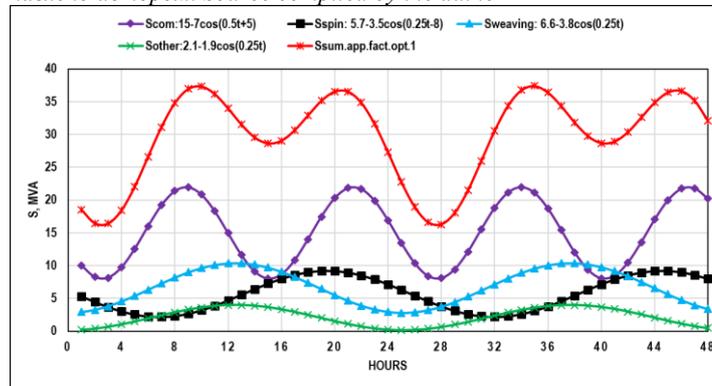


Fig.5. Approximate graphs of loads of electrical consumers at substation "Kabun-1" (Option 1), the start time of the weaving production is 12:30.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

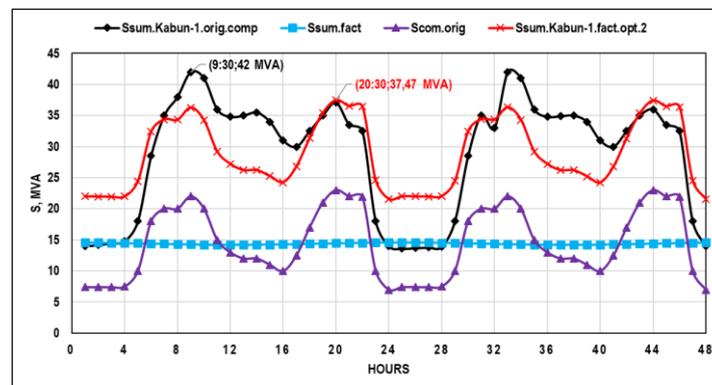


Fig.6. Actual load graphs of electrical consumers of transformers 33/11 kV at substation Kabun-1, spinning and weaving factory, with a shift in the start time (option 2) and reactive power compensation of domestic consumers.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 13 shows the statistical characteristics of the conducted studies.

Table 13 shows that in the second option of shifting the start time, the maximum load is reduced by 4.5 MVA (42–37.47), and its onset time is shifted from 9:30 in the original option to 20:30 in the second option (Fig. 6). The value of the load variation decreases from 0.33 in the original case to 0.19 in the second case, i.e. the graph is compressed. To assess the service life of transformers [16], it is required to determine the graphical changes in the dependence and load factors of transformers and the corresponding winding heating temperatures, and then the value of the relative service lives.

Table 13

Statistical characteristics of the actual and approximate load graphs of transformers with a voltage 33/11 kV at substation Kabun-1 with various options for shifting the start time of the spinning and weaving factory divisions.

Index	Original with compensation		Option-1	Option-2	
	Approx	Real	Approx	Approx	Real
S_{av}, MVA	29.81	28.93	29.60	29.38	28.85
S_{max}, MVA	42.69	42.00	37.40	36.36	37.47
K_{fill}	0.70	0.69	0.79	0.81	0.77
S_{eff}, MVA	30.88	30.46	30.29	29.74	29.46
Φ_s, MVA	8.41	9.53	6.92	5.15	5.62
(s)	0.28	0.33	0.23	0.18	0.19

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

The load factor of the second option is calculated by the expression

$$t=1h \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_{L,opt.2} = \frac{S_{sum.Kabun-1.fact.opt.2}}{S_{n,T}} \\ K_{L,opt.2} = \frac{21.99}{40} = 0.55 \end{array} \right\} \quad (15)$$

Using [6], we calculate the value of the relative service life, the second option

$$t=1h \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{ser.life.opt.2} = -1.46K_{L,opt.2}^2 - 0.5K_{L,opt.2} + 1.83 \\ T_{ser.life.opt.2} = -1.46(0.55)^2 - 0.5(0.55) + 1.83 \\ T_{ser.life.opt.2} = 1.35 \end{array} \right\} \quad (16)$$

All calculated values are presented in table 14

Table 14

Calculations of the value of the load factor of the transformers at substation "Kabun-1" of the second option

	$S_{sum.Kabun-1.fact.opt.2}, MVA$	$S_{n,T}, MVA$	$K_{L,opt.2}$	$T_{ser.life.opt.2}$
Average	28.85	40	0.75	0.9
Sum	37.47	40	0.94	1.35

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.7 and 8 show the results of calculations of the load factor and the relative service life of transformers, the second option.

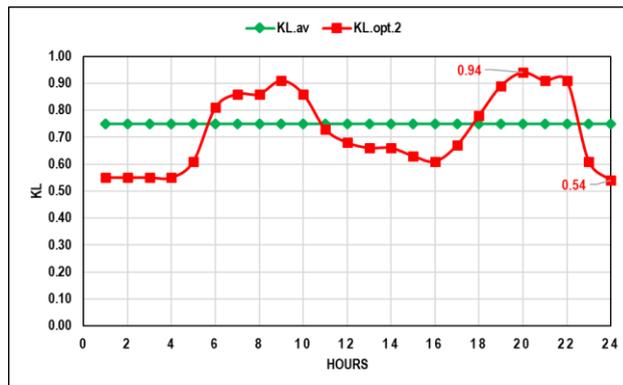


Fig.7. Graphical dependences of the daily values of the load factor of the transformers at substation "Kabun-1" (the second option for shifting the start time of electrical consumers).

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

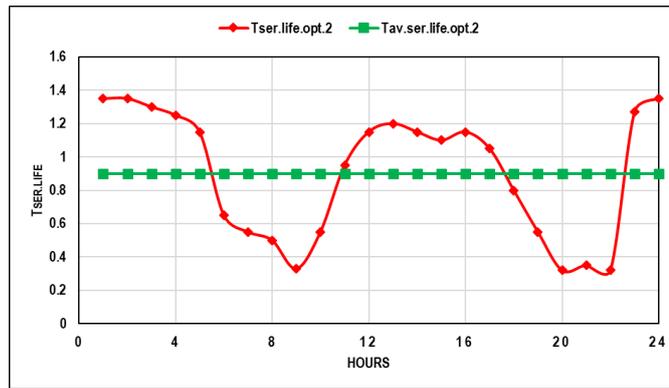


Fig.8. Graphical dependences of the relative service life of the transformers at substation Kabun-1 (the second option for shifting the start time of work)

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

From Fig. 7 it is shown that the value of the average load factors of transformers (the second option for the start time of the spinning and weaving factory) is 0.75, the limit values are 0.54 -0.94.

It can be seen from Fig. 8 that the value of the average relative service life of transformers (second option) is 0.9.

From [6], we consider the values of the heating temperature of the transformer windings of the second option

$$t=1h \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{ser.life.opt.2} = -0.125 t_{winding.opt.2} + 11.792 \\ t_{winding.opt.2} = \frac{11.79 - T_{ser.life.opt.2}}{0.125} \\ t_{winding.opt.2} = \frac{11.79 - 1.35}{0.125} = 83.52 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (17)$$

Table 15 shows the values of the heating temperature of the transformer windings at substation Kabun-1 of the second option.

Table 15

Calculation of the heating temperature of the transformer windings at substation Kabun-1 of the second option

	$t_{winding.orig}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{ser.life.opt.2}$	$t_{winding.opt.2}$
Average	90.3	0.9	87
Max	97.5	1.35	91.76
Min	83.5	0.32	83.52

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.9 shows graphs of the calculation results from table 15 for various load options.

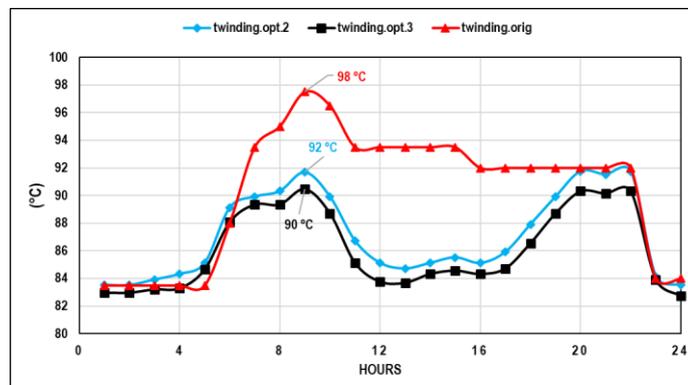


Fig.9. Graphical dependences of the daily values of the heating temperature of the winding of the transformers at substation Kabun-1 for various load options.

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

From Fig. 9, it is noticed that it is less than desired, since the period of the greatest loads, the value of the heating temperature of the windings is higher than the permissible 85°C.

Table 16 presents a comparison between the original, second and third option.

Table 16

The values of the winding heating temperature and the service life of the transformers at substation Kabun-1 for various options for load graphs

Load characteristic	Coefficient transformer loading		Winding heating temperature, °C		Relative service life $T_{ser.life}$
	$K_{L,max}$	$K_{L,av}$	$t_{winding,max}$	$t_{winding,av}$	
Original graph for reactive power compensation	1.05	0.75	98	90	0.63
Graph according to option 2 when approximating reactive power compensation	0.94	0.72	92	87	0.9
Graph according to option 3 when approximating reactive power compensation	0.9	0.72	90	84	1.05

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

From table 16, it is noted that the value of the service life of transformers for the load graph for the second equalization option is significantly greater (about one and a half times) (0.63→0.9) than for the original load graph, taking into account reactive power compensation.

B. Third option.

It is possible to analyze additional measures to equalize the load graphs of transformers when changing the start time for some small industrial power consumers in the new sector of Adra.

The results of studies of the characteristics of the load graphs of communal, administrative and public electrical consumers, a mechanical workshop and a juice factory plant in the city of Adra, powered by transformers with a voltage 33/11 kV at substation Kabun-1, are presented in [1, 5, 6].

The third option for reducing power consumption and leveling the load graph of transformers with a voltage 33/11 kV at substation Kabun-1 includes the following measures:

1. Installation of a capacitor bank on the low voltage side of transformers in a spinning and weaving factory.
2. Shift in the start time of the weaving production from 5:30 to 12:30.
3. Shift in the start time of the spinning production from 5:30 to 22:30.
4. Shift in the start time of the mechanical workshop from 7:30 to 23:30.
5. Shift the start time of the juice factory from 8:30 to 0:30.

The total power at substation "Kabun-1" of the third option:

$$\left. \begin{aligned}
 S_{Kabun-1,opt.3} &= S_{Com.opt.3} + S_{Spin\&weaving.opt.3} \\
 S_{Com.opt.3} &= S_{ad\&pub} + S_{Juice.opt.3} + S_{Mec.opt.3}
 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Table 17

Calculations of the total power at substation "Kabun-1" of the third option

	Administrative & public	Mechanical workshop	Juice factory	Communal	Spin & weaving factory	«Kabun-1» opt.3
Average (MVA)	13.05	0.46	0.90	14.41	14.51	28.92

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.10 shows the graphs of the total power loads of transformers of the third option.

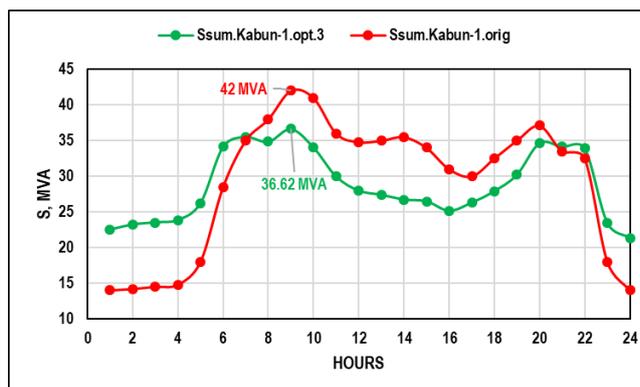


Fig.10. Graphs of the total power loads of transformers with a voltage 33/11 kV for the original and for the third shift option

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

For the third option of shifting the start time of work, the largest load power is reduced by 5.38 MVA (42.0 - 36.62), the load variation is reduced from 0.33 to 0.17 in relation to the second option only for divisions of the spinning and weaving factory, the largest value decreased by another 0.85 MVA (42.0 - 37.47), while in all options the average value of the load power of transformers with a voltage 33/11 kV at substation "Kabun-1" is constantly equal to 28.9 (table 18).

Table 18

Statistical parameters of the actual load graphs of transformers with a voltage 33/11 kV at substation "Kabun-1" for the third option of shifting the start time of electrical consumers

Parameter	Administrative & public	Mechanical workshop	Juice factory	Communal	Spin & weaving factory	«Kabun-1» opt.3	«Kabun-1» original
S_{av} , MVA	13.05	0.46	0.90	14.41	14.51	28.92	28.93
S_{max} , MVA	21.40	1.10	1.80	21.70	15.94	36.62	42.00
K_{fill}	0.61	0.42	0.50	0.66	0.91	0.80	0.69
S_{eff} , MVA	14.12	0.64	1.06	15.22	14.54	29.33	30.46
Φ_s , MVA	5.39	0.45	0.57	4.90	0.99	4.89	9.53
(s)	0.41	0.98	0.63	0.34	0.07	0.17	0.33

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Also, as the second option, you can evaluate the service life of the transformer of the third option (we use (15), (16) and (17)) and the results in the tables 19 and 20.

Table 19

Calculations of the value of the load factor of transformers and the relative service life at substation "Kabun-1" of the third option

	$S_{n,T}$	$S_{sum.Kabun-1.opt.3}$	$K_{L.opt.3}$	$T_{ser.life.opt.3}$
Average (MVA)	40	28.75	0.72	1.45
Max (MVA)	40	36.21	0.90	1.02

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 20

Calculations of the heating temperature of the transformer windings at substation Kabun-1 of the third option

	$t_{winding.orig}$	$T_{ser.life.opt.3}$	$t_{winding.opt.3}$
Average (°C)	90.3	1.45	84
Max (°C)	97.5	1.02	90

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Fig.11 and 12 show the results of calculations of the load factor and the relative service life of transformers of the third option.

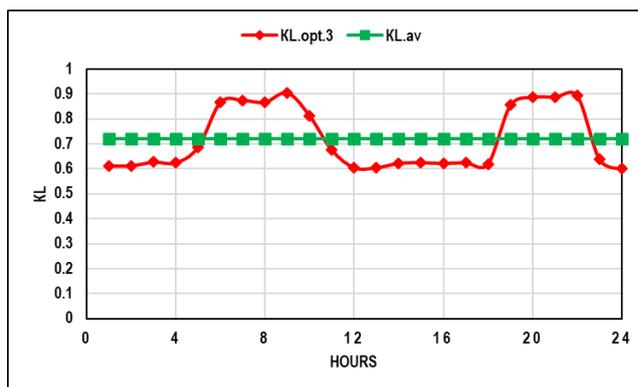


Fig.11. Graphical dependences of the daily change in the load factor of the transformers at substation "Kabun-1" (the third option for shifting the start time of electrical consumers)

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

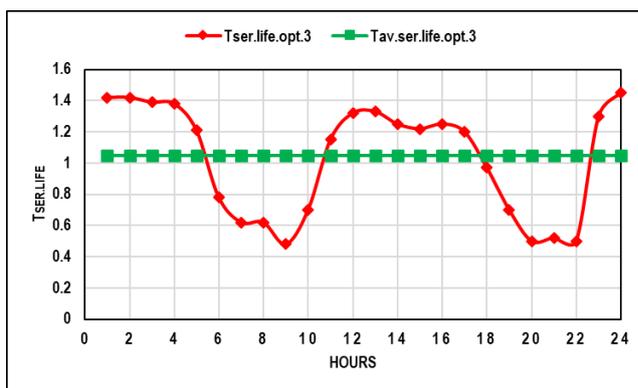


Fig.12. Graphical dependences of the relative service life of transformers "Kabun-1" (the third option for the start of operation of electrical consumers)

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Table 16 compares the original and second options with the third option. The research results showed the following:

1. The value of the average load factor of transformers (the third option of the shift in the start time of the operation of electrical consumers at substation Kabun-1) is 0.72, the limit values are 0.61–0.91.

2. The value of the average relative service life of transformers in the third option is 1.05 - slightly more than desired. This is explained by the fact that the value of the average winding heating temperature [17, 18] is less than 84°C (allowable temperature of 85°C).

3. The value of the relative service life of transformers in the case of the load graph corresponding to the third option is significantly higher (almost twice) (0.63→1.05) than with the original graph with the installation of compensating devices.

Conclusion (Заключение).

1. Approximation functions have been developed for daily graphs of active power loads of transformers of the spinning and weaving factory (first and second approximations).

2. A sufficiently high degree of coincidence of the statistical parameters of the load graphs has been proved; estimates of the error of the approximation function for approximation 2.

3. It is proved that the numerical parameters of the sum of the approximated graphs and the original graph of the spinning and weaving factory approximately coincide. Therefore, to align the load graphs of the factory, the developed approximation functions were used, and then the obtained results of the load parameters were compared with the real charts.

4. As a result of the research, it was established that the service life of the transformers at substation Kabun-1 (the second option and the third option) depends on the start time of the spinning and weaving factory units. At the same time, it was revealed.

A. In the second option, the service life of transformers with an equalization load graph is significantly longer (about one and a half times) (0.63→0.9) than for the original load graph taking into account reactive power compensation and the average winding heating temperature decreased by 3 °C (90 → 87) °C.

B. In the third option, the service life of transformers is significantly higher (almost twice) (0.63→1.05) than with the original graph with the installation of compensating devices and the average winding heating temperature decreased by 6 °C (90 → 84) °C.

References

1. Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):3-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
2. Naderian A., Pattabi P. and Lamarre L. Improving the Assessment of Remaining Life of Service Aged Power Transformers, *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019*, pp. 330-334, doi: 10.1109/EIC43217.2019.9046610.
3. Chitnavis K. and Bhasme N. R. Review of critical analysis for life estimation of power transformer, 2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES), Allahabad, India, 2017, Pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICPCES.2017.8117632.
4. Muthanna K. T., Sarkar A., Das K. and Waldner K. Transformer insulation life assessment, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, №. 1, pp. 150-156, Jan. 2006, DOI: 10.1109/TPWRD.2005.855474.
5. Alzakkar A., Gracheva E. and Samofalov Y. An Analytical Study of the Electrical Power Consumption in the Industrial City (Adra – Syria), 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 410-415, doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139241.
6. Alzakkar A., Mestnikov N.P., Maksimov V.V., Valeev I.M. Assessment of the voltage stability index of electric networks supplying charging stations using a multilayer perceptron. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):36-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49>.
7. Yakubova D. K., A study of the influence of load modes of the transformer TNTS-000/220 1000-UHL1 for worn insulation. *Conference proceedings: Energy for resource tezhash muammolari*, 2016. (In Russ.).
8. Anishchenko V.A., Ivanov V.V. Ascertainment of admissible systematic overloads in the distributive oil-transformers. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.* 2015;(3):5-15. (In Russ.).
9. Chatterjee A. and Roy N. K. Mathematical model for predicting the state of health of transformers and service methodology for enhancing their life, 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Niagara Falls, ON, Canada, 2011, Pp. 126-129, DOI: 10.1109/CCECE.2011.6030423.
10. Gracheva E.I., Naumov O.V., Fedotov E.A. Influence of a load capability of power transformers on their operational characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2017;19(7-8):71-77. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-7-8-71-77>.
11. Serebrennikov D.S., Goldstein V.G. Evaluation of the technical condition of power transformers with a long service life based on the results of external thermal vision diagnosis. *News of Higher Educational Institutions. Electromechanics.* 2014. - №. 3. - Pp. 100-102. (In Russ.).
12. Vakhrushev A. I., Aleksanyan G. A. Approximation of functions Applied questions of exact sciences– 2018. – Pp. 35-37. (In Russ.).
13. Zakharov V. S. Influence of 35 kV feeder parameters on the approximation functions of the criteria for default location 2020. - №. 58-3. - Pp. 79-83. – DOI:10.18411/lj-02-2020-55. – EDN RIFPQA. (In Russ.).
14. Bazarov, A. A. The method of leveling the load graph of powerful induction installations. *Technical Sciences Series Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series.* 2021. - Vol. 29, №. 4 (72). - S. 71-85. – (In Russ.) DOI 10.14498/tech.2021.4.6. – EDN KPVHQQ.
15. Titarenko, O. N. Analysis of methods for leveling daily load graph. *Power installations and technologies.* - 2018. - Vol. 4, No. 3. - Pp. 67-73. – EDN VAQFER. (In Russ.).
16. Mayorov A.V., Lvov M.Yu., Lvov Yu.N., Komarov V.B., Ershov B.G. Power transformers and autotransformers of electrical network life time prediction. *Power engineer* - 2018. - №. 11. - Pp. 17-20. – EDN YSEYDR. (In Russ.).
17. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A. Analysis and study of power consumption of objects in the industrial zone of Adra-Syria. *Power engineering: research,*

equipment, technology. 2023;25(1):118-129. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129>.

18. Daghran M., Wang Z., Liu Q. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.34, Issue.2, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.

Authors of the publication

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

Elena I. Gracheva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the University of Electric Power Industry, Kazan State Power Engineering University.

Ahmad Alzakkar – Master of Technology and Technology, graduate student of the Institute of Electric Power Engineering of Kazan State Power Engineering University.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of University NOVA of Lisbon, Portugal.

Nikolai P. Mestnikov – North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov.

Получено 15.06.2023 г.

Отредактировано 20.06.2023 г.

Принято 06.07.2023 г.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Зацаринная Ю.Н.¹, Реутин Г. В.¹, Курилов С.С.¹, Исаева О.В.¹, Ковалев Г.С.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Сегодня степень интеграции ВИЭ в энергосистему является показателем технологического и промышленного развития государства. Возобновляемая энергетика является драйвером развития экономики, науки и образования. В России самый большой технический потенциал из возобновляемых источников энергии у Солнца (в млн. тоннах условного топлива) составляет $2,3 \cdot 10^3$, второе место занимает энергия ветра - $2 \cdot 10^3$. Но при использовании энергии Солнца, как и многих других возобновляемых источников энергии, возникают большие сложности с прогнозированием выработки электроэнергии из-за зависимости их от метеоусловий. Авторами статьи решается актуальная задача прогнозирования генерации энергии от солнечных электрических станций с использованием систем машинного обучения. **ЦЕЛЬ.** Целью данной работы является исследование производительности современных методов искусственного интеллекта для создания платформы прогнозирования вырабатываемой мощности от солнечной станции в существующую сеть. Разработать архитектуру информационно-коммуникационной системы распределительной сети и модель прогнозирования фотоэлектрической мощности электрической станции на основе методов машинного обучения. **МЕТОДЫ.** Одним из подходов к решению этой задачи является использование алгоритмов машинного обучения. Такие алгоритмы при правильно выбранной модели обучения способны с высокой точностью до 95% предсказывать объем генерации электроэнергии на сутки вперед. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведено сравнение значений реальной генерации и предсказанной генерации пятью алгоритмами машинного обучения, такие как нейронные сети, линейная регрессия, дерево решений, случайный лес, адаптивный бустинг. Наименьшую среднеквадратическую ошибку на проверочных данных имеет алгоритм случайного леса. Решена задача оптимизации радиальной топологии сети, которая минимизирует совокупные потери активной мощности. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Анализ построения рабочей модели машинного обучения, продемонстрировал, что для построения оптимальной модели, необходима только история выработки электроэнергии этой станции, сопоставленная с рассчитанными и измеренными данными погоды. Стабильность модели была проверена путем применения метода перекрестной проверки в различных условиях обучения и тестирования. Полученные результаты показали, что модель надежно работает, поскольку среднеквадратическая ошибка самой точной модели находится в районе $600 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (4 %).

Ключевые слова: *распределенная генерация; возобновляемая энергетика; солнечная электростанция; прогнозирование выработки солнечной энергии; искусственный интеллект; машинное обучение.*

Для цитирования: Зацаринная Ю. Н., Реутин Г. В., Курилов С.С., Исаева О.В., Ковалев Г.С. Прогнозирование выработки электроэнергии от ВИЭ методами машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С.81-92. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-81-92

PREDICTION OF ELECTRICITY GENERATION FROM RES BY MACHINE LEARNING METHODS

YUN. Zacarinnaya¹, GV. Reutin¹, SS. Kurilov¹, OV. Isaeva¹, GS. Kovalev²

¹Kazan State Power Engineering University, Russia

²Kazan Federal University, Russia

Abstract: *RELEVANCE.* Today, the degree of integration of renewable energy sources into the energy system is an indicator of the technological and industrial development of the state. Renewable energy is a driver for the development of the economy, science and education. In Russia, the largest technical potential from renewable energy sources in the Sun (in million tons of standard fuel) is $2.3 \cdot 10^3$, the second place is occupied by wind energy - $2 \cdot 10^3$. However, the use of solar energy is associated with great difficulties in predicting the generation of electricity due to its dependence on meteorological conditions, and there is an acute issue of forecasting the generation.

In this article, the authors propose a solution to the urgent problem of predicting energy generation from solar power plants using machine learning systems. TARGET. The purpose of this work is to study the performance of modern artificial intelligence methods to create a platform for predicting the power generated from a solar station to an existing network. Develop the architecture of the information and communication system of the distribution network and the model for predicting the photovoltaic power of the power plant based on machine learning methods. *METHODS.* One approach to solving this problem is to use machine learning algorithms. Such algorithms, with a correctly chosen training model, are capable of predicting the volume of electricity generation a day ahead with a high accuracy of up to 95%. *RESULTS.* The values of real generation and predicted generation were compared by five machine learning algorithms, such as neural networks, linear regression, decision tree, random forest, adaptive boosting. The random forest algorithm has the smallest mean square error on the test data. The problem of optimization of the radial topology of the network, which minimizes the total loss of active power, is solved. *CONCLUSION.* An analysis of the construction of a working machine learning model showed that in order to build an optimal model, only the history of the power generation of this plant, compared with the calculated and measured weather data, is needed. The stability of the model was tested by applying the cross-validation method under various training and testing conditions. The results obtained showed that the model works reliably, since the root-mean-square error of the most accurate model is in the region of 600 kWh (4%).

Key words: distributed generation; renewable energy; solar power plant; forecasting the generation of solar energy; artificial intelligence; machine learning.

For citation: Zatsarinnaya YuN, Reutin GV, Kurilov S S, Isaeva OV, Kovalev GS Forecasting electricity generation from renewable energy using machine learning methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(3):81-92. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-81-92.

Введение (Introduction)

В современном мире наблюдается новое направление развития глобальной энергетики: мир вступает в этап 4-го энергетического перехода, характеризующегося широким использованием ВИЭ и постепенным вытеснением углеводородного топлива. Использование возобновляемых источников энергии становится приоритетной задачей для многих стран. Существует ряд приоритетных сфер применения возобновляемых источников энергии, формирующих наибольшие секторы внутреннего рынка и обеспечивающих достижение наибольшего эффекта для экономики. К ним относятся системы распределенной энергетики, микрогриды, смартгриды. Применение возобновляемых источников в качестве источников энергии для микрогридов актуально из-за удаленности большого количества районов от топливных магистралей и централизованного энергоснабжения [1]. Главным образом, централизованного электроснабжения не имеют сельские населенные пункты районов Севера, Дальнего Востока и Сибири. Всего таких изолированных энергоузлов насчитывается около 30 000, а проживают в них суммарно около 11 млн. человек. Обеспечение электроэнергией таких районов возможно либо за счет

строительства станции внутри децентрализованной зоны, либо за счет централизованного энергоснабжения [2]. Чаще всего электроснабжение таких районов может осуществляться дизельными электростанциями с высокими операционными затратами (ОРЕХ) из-за дороговизны привозного топлива. Использование ВИЭ в качестве источника энергии имеет низкий ОРЕХ и целесообразность их применения в микрогридах подтверждается рядом исследований [2,3]. Согласно энергетической стратегии России в период до 2030 года вовлечение объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в топливно-энергетический комплекс нашей страны будет оставаться актуальной задачей. Об этом свидетельствует принятие федерального закона № 471 27 декабря 2019 года Государственная Дума Российской Федерации приняла Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации». Данный закон позволит объектам микрогенерации, максимальная мощность которых не будет превышать 15 кВт стать из сторон купли-продажи электроэнергии. Данный закон позволит объектам микрогенерации, максимальная мощность которых не будет превышать 15 кВт стать из сторон купли-продажи электроэнергии. Основные источники таких мини-электростанций – это ВИЭ, в особенности солнечная и ветровая энергия. Таким образом, данный закон будет способствовать созданию объектов микрогенерации и повышению доли ВИЭ в энергобалансе России. По данным Международного энергетического агентства (МЭА) солнечная фотоэлектрическая энергия и находится на третьем месте в мире среди ВИЭ, но начиная с 2016 года среди вводимых мощностей на основе ВИЭ, первое место по объему занимают солнечные панели [3]. Данные института Энергетической стратегии свидетельствуют, что в России самый большой технический потенциал из возобновляемых источников энергии у Солнца (в млн. тоннах условного топлива) составляет $2,3 \cdot 10^3$, второе место занимает энергия ветра - $2 \cdot 10^3$. Солнечная радиация, которая поступает из космоса составляет примерно 7,5 кВтч/год, что превышает потенциал всех возобновляемых и невозобновляемых источников энергии, преобразование которых позволит удовлетворить все энергетические потребности человечества. Кроме того, основным из факторов развития ВИЭ можно назвать снижение вредных воздействий на экологическую среду при переходе к возобновляемой генерации. В 2022 году в России выработка энергии на тепловых электростанциях (ТЭС) составляет 611,9 млрд кВт ч (62,9%) [4]. При сжигании углеводородного топлива происходит выброс в атмосферу парниковых газов, что ведет к изменению климата и негативно сказывается на окружающей среде и, как следствие, на благополучии людей [5,6]. Однако развитие энергетического сектора, а особенно освоение ВИЭ связано с большими финансовыми вложениями во всех странах осуществляется при особой законодательной и политической поддержке правительства. Основными возобновляемыми источниками во всем мире стали солнечная и ветровая энергии. Последние десятилетия наблюдается тенденция снижения затрат на оборудование, используемое для получения энергии с использованием солнечной и ветровой энергии [7]. Данную тенденцию можно проследить на примере стоимости солнечных панелей. Она стремительно снижается за счет снижения удешевления комплектующих и расходов на установку, а также благодаря политике и маркетинговым усилиям компаний. В будущем эта тенденция будет усиливаться, и новые технологии будут использоваться для снижения затрат на строительство, эксплуатацию и интеграцию объектов на возобновляемых источниках энергии в существующие энергосистемы, что может способствовать ускорению перехода к возобновляемым источникам энергии в России.

Широкое распространение фотоэлектрических систем и растущая мощность солнечных электростанций приводит к возникновению двух основных проблемы этих источников генерации – это изменчивость и неопределенность выработки, а следовательно, мощность фотоэлектрических модулей изменчива во всех временных масштабах и эту изменчивость нужно учиться прогнозировать для экономически эффективной работы энергосистем. Точный прогноз располагаемыми генерируемыми мощностями имеет значение для системного оператора, осуществляющего баланс мощности в энергосистеме. Для получения максимального дохода от солнечных станций необходимо разработать алгоритм прогнозирования выработки электроэнергии с учетом погодных условий, вероятностного характера прогнозных значений в краткосрочном и долгосрочном планировании.

Задача поиска оптимального потока мощности формулируется со всеми ограничениями системы и впоследствии решается для получения оптимальной реконфигурации сети. Реконфигурация сети сводится к изменению топологической структуры путем изменения состояния выключателей, что является эффективным способом

балансировки нагрузки и повышения надежности работы энергосистемы и снижения потерь мощности. Сеть может состоять из генераторов на традиционных, а также возобновляемых источниках энергии, таких как солнечные электростанции. Классический поиск оптимального потока мощности представляет собой решение системы уравнений с нелинейными ограничениями. Учет прерывистой природы солнечной энергии усложняет проблему поиска оптимума, поэтому прогнозирование выработки возобновляемых источников в настоящее время является крайне актуальным и перспективным направлением. Машинное обучение расширяет возможности для обработки и анализа данных. Поэтому, платформы прогнозирования генерации энергии с помощью искусственного интеллекта облегчат планирование покрытия графика на сутки вперед и оптимальной загрузки всех станций, тем самым минимизируя затраты на производство электроэнергии в энергосистеме в целом.

Авторами статьи поставлена цель исследовать производительность современных методов искусственного интеллекта для создания платформы прогнозирования вырабатываемой мощности от солнечной станции, разработать архитектуру информационно-коммуникационной системы распределительной сети и разработать модель прогнозирования фотоэлектрической мощности электрической станции на основе методов машинного обучения. Эти платформы с ростом генерации электроэнергии от фотоэлектрических станций энергии окажутся ценными в ближайшей перспективе.

Литературный обзор (Literature Review)

Существует множество различных методов, позволяющих прогнозировать выработку электроэнергии фотоэлектрическими установками. Например, существуют математические модели, которые принимают на вход параметры температуры окружающей среды, интенсивность излучения и скорость ветра и выдают в качестве выходного параметра генерируемую мощность. Такие модели относятся к косвенным методам прогнозирования выработки солнечной энергии, но они хороши для первоначального проектирования станции, но они могут быть неэффективны для реального прогнозирования выработки, поскольку в них используются приблизительные данные процессов, происходящих на реальной электростанции. [8]

Также распространение получили статистические методы, включающие в себя модель авторегрессии скользящего среднего и экспоненциальное сглаживание. Такие модели являются довольно популярными для прогнозирования выработки энергии, но не учитывают прогноз фотоэлектрического излучения.

Методы машинного обучения используют алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети, линейная регрессия, дерево решений, случайный лес, адаптивный бустинг использовались для прогнозирования выходной мощности фотоэлектрических батарей. Идея использования машинного обучения заключается в полном игнорировании физической взаимосвязи между входными и выходными данными и самостоятельном поиске компьютером наиболее удобного соотношения между ними. Точность такого метода зависит от размера базы данных, выбранной методологии и правдивости исходных данных.

Гибридные методы обычно объединяют метеорологические модели с искусственным интеллектом и статистическими моделями. [9]

Материалы и метод (Materials and Methods)

Предлагаемый в работе подход в прогнозировании выработки солнечной энергии предполагает использование нескольких моделей машинного обучения: линейная регрессия, дерево решений, случайный лес, адаптивный бустинг. Эти алгоритмы оптимизации используются для задач поиска взаимосвязей с метеоданными. Также авторы использовали нейронные сети, поскольку они довольно часто встречаются в аналогичных исследованиях.

А. Нейронные сети

Нейронные сети – это большие системы взаимосвязанных элементов, совместно работающих над решением конкретных задач. Вдохновением к их созданию послужили биологические системы и то, как такие системы обрабатывают информацию.

На вход нейронной сети подаются исходные данные, составляющие первый слой сети. Последний слой сети – это выходные данные – значение генерации. Между первым и последним слоем существуют так называемые скрытые слои.

Суть нейросети, как механизма обработки информации, состоит в активации нейронами из предыдущего слоя нейронов в следующем слое с целью обнаружить какой-нибудь шаблон. Для этого каждому соединению между нейронами назначают веса и считают взвешенную сумму весов для каждого нейрона. В результате может получиться любое число. Для активации нейронов в следующем слое при определенном значении необходимо к

взвешенной сумме добавить константу, называемую сдвигом и передать это число в функцию активации, которая чаще всего является сигмоидой.

В результате нейронная сеть содержит тысячи весов и сдвигов, которые можно менять чтобы настраивать поведение сети. Поэтому когда мы говорим об машинном обучении, имеется в виду – заставить компьютер найти такие значения для всех этих чисел так, чтобы это решило поставленную задачу.

Для математического представления всех весов и сдвигов, необходимо представить все веса в виде матрицы, данные первого слоя сети в виде вектора- столбца и произвести матричное произведение этих матриц, а затем добавить к матричному произведению сдвиги, представленные в виде вектора-столбца и применить к получившейся матрице сигмоидную функцию активации. [10]

$$a^{(2)} = \sigma(Wa^{(1)} + b),$$

где $a^{(1)}$ – активации нейронов из предыдущего слоя

$$\begin{pmatrix} a_1^{(1)} \\ a_2^{(1)} \\ \vdots \\ a_n^{(1)} \end{pmatrix}$$

$a^{(2)}$ - активации нейронов последующего слоя, σ - сигмоидная функция активации, W - матрица весов

$$\begin{pmatrix} \omega_{11} & \dots & \omega_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{k1} & \dots & \omega_{kn} \end{pmatrix},$$

b - матрица сдвигов

$$\begin{pmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(1)} \\ \vdots \\ b_n^{(1)} \end{pmatrix}.$$

В работе авторы использовали нейронную сеть с 10 скрытыми слоями из 7 нейронов, сигмоидальную функцию активации и использовали функцию байесовской регуляризации для обучения сети.

В. Линейная регрессия

Является базовой разновидностью регрессии. Простая линейная регрессия позволяет понять взаимосвязь между двумя непрерывными переменными [11] Линейная регрессия описывается следующим уравнением:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon,$$

где β - коэффициенты регрессии, ε - ошибка регрессии.

С. Дерево решений

Древовидная структура, напоминающая блок-схему, которая использует метод ветвления, иллюстрируя каждый возможный результат принятия решения. Каждый узел дерева соответствует одной проверке условия по определенной переменной, а каждая ветвь является результатом этой проверки.

Задача максимизации полученной информации при каждом разделении, сводится к задаче определения целевой функции, которую необходимо оптимизировать с помощью алгоритма дерева решений. Целевая функция в данном случае описывается следующим уравнением.

$$IG(D_p, f) = I(D_p) - \left(\frac{N_{left}}{N_p} I(D_{left}) + \frac{N_{right}}{N_p} I(D_{right}) \right),$$

где f – функция разделения, D_p, D_{left}, D_{right} – наборы данных родительского и дочерних узлов, I – мера примеси, N_p – общее количество выборок в родительском узле, а N_{left} и N_{right} – количество выборок в дочерних узлах. [12]

D. Случайный лес

Случайный лес состоит из большого количества отдельных деревьев решений, которые работают как ансамбль методов. Каждое дерево в случайном лесу возвращает прогноз класса, и класс с наибольшим количеством голосов становится прогнозом леса. Случайный лес описывается следующим уравнением [13]

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i(x),$$

где N – число деревьев решений случайного леса, $b_i(x)$ – дерево решений.

E. Адаптивный бустинг

Адаптивный бустинг – это частный случай градиентного бустинга. Это техника машинного обучения для задач классификации и регрессии, которая строит модель предсказания в форме ансамбля слабых предсказывающих моделей, обычно деревьев решений. Адаптивный бустинг описывается следующим уравнением [14]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i(x),$$

где h_m – базовая функция, дерево решений.

Модель машинного обучения

F. Исходные данные

Для прогнозирования генерации от СЭС использовалась следующая исходная информация:

1. Метеорологические данные, взятые из открытых источников. В частности, были использованы параметры влажности, прозрачности и температуры окружающей среды;
2. Измеренные данные – почасовая выработка электроэнергии солнечной электростанцией, данные солнечного излучения
3. Рассчитанные данные солнечного угла, длительность солнечного дня.

Корреляция параметров исходных данных с величиной генерации электроэнергии изображена на рисунке 1. Из рисунка видно, что наибольшую корреляцию с выработкой электроэнергии имеет величина солнечного потока.

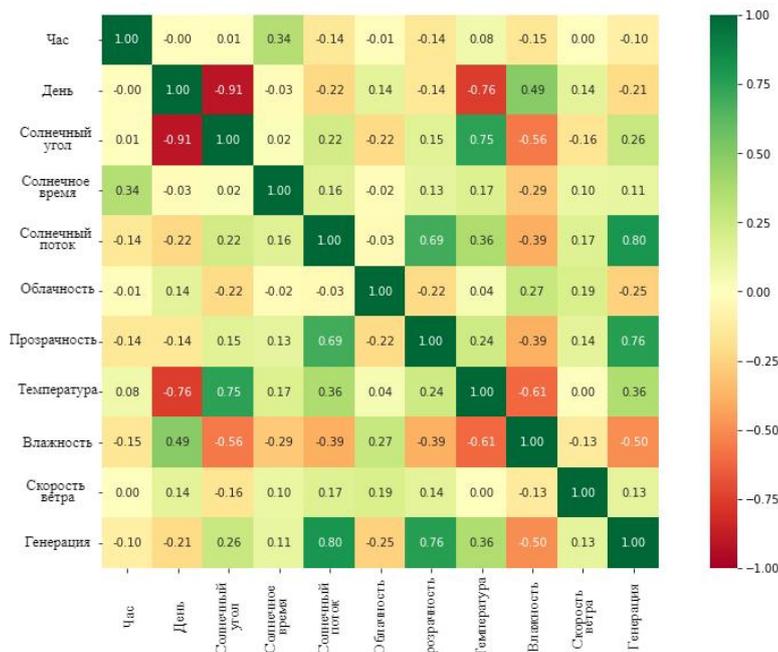


Рис. 1. Матрица коэффициентов корреляций параметров. Fig. 1. Matrix of correlation coefficients of parameters.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Однако, построить модель машинного обучения высокой точности, исходя только из величины солнечного потока невозможно из-за высокого разброса зависимости одной величины от другой (рис. 2). Для получения высокоточной модели необходимо учитывать все параметры, оказывающие влияние на значение величины генерации.

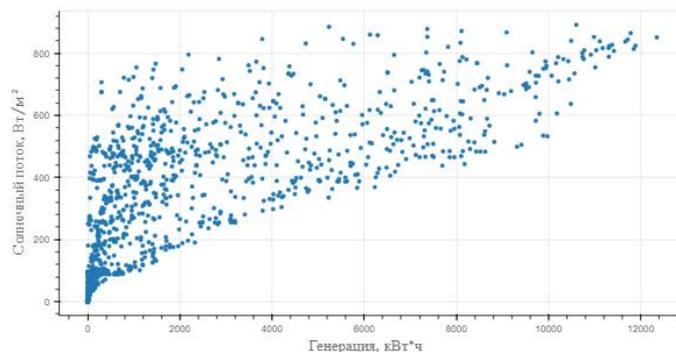


Рис. 2. Диаграмма рассеяния, соответствующая массивам пар данных генерации и солнечного излучения. *Fig. 2. Scattering diagram corresponding to arrays of generation and solar radiation data pairs.*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Г. Сбор информации на СЭС

Для создания эффективной модели прогнозирования выработки электроэнергии, необходима автоматизированный сбор данных станции, включающие в себя историю выработки, данные солнечного излучения, а также необходимы фактические метеорологические данные, данные метеорологического прогнозирования. Однако все они могут быть получены от оборудования совершенно различных производителей, поэтому может возникнуть вопрос о совместимости этого оборудования. [15]

Стандарт IEC 61850 отвечает за совместимость устройств, предоставляет единый протокол обмена данными, необходимыми для функционирования станции.

На рисунке 3 представлена схема информационных и коммуникационных технологий станции. Она состоит из трех основных уровней. [16]

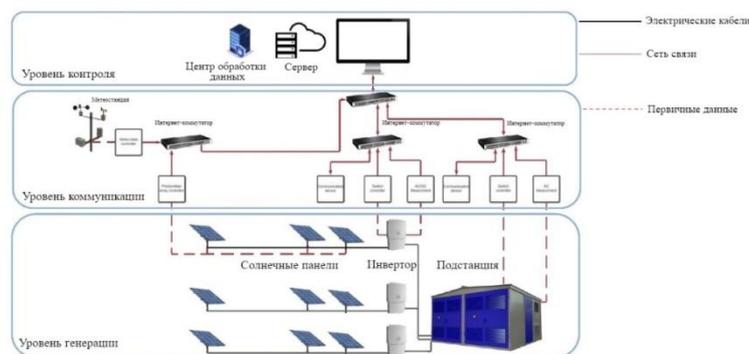


Рис. 3. Информационные и коммуникационные технологии на солнечной электростанции *Fig. 3. Information and communication technologies of a solar power plant*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На нижнем уровне – уровне генерации установлены датчики, контролирующие состояние солнечных панелей, в инверторах со встроенными выключателями нагрузки установлены датчики положения выключателей, а также амперметры и вольтметры. Также первичными данными в некотором роде являются метеорологические данные, полученные с устройств и датчиков, установленных на метеорологической башне.

Информация от контроллера выключателя и контроллера постоянного и переменного тока поступает в устройство связи. Устройство связи управляет работой контроллеров, собирает данные и передает их на верхний уровень схемы, в дата центр, где эти данные хранятся. Впоследствии эти данные уже могут быть использованы алгоритмами машинного обучения для предсказания выработки электроэнергии солнечной электростанцией [17].

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

На рисунке 4 изображено сравнение значений реальной генерации и предсказанной генерации разными алгоритмами машинного обучения. Сравнение было сделано для 9-ти дней октября 2019 года. Из рисунка видно, что все алгоритмы, за исключением линейной регрессии, в ночное время показывают нулевую генерацию, а в дневное время генерация представляет из себя кривую линию. Для сравнения между собой разных моделей машинного обучения, была использована перекрестная проверка данных, смысл которой заключается в том, что обучающий набор делится на K подвыборок, одна подвыборка сохраняется в качестве данных для модели верификации, а другие выборки используются для обучения. Перекрестная проверка повторяется K раз, и каждый подвыбор проверяется один раз. По полученным результатам высчитывается среднее для получения достоверной оценки точности модели. [14] При перекрестной проверке среднеквадратическая ошибка рассчитывалась по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P(i) - P_m(i)}{P_n(i)} \right)^2} \cdot 100$$

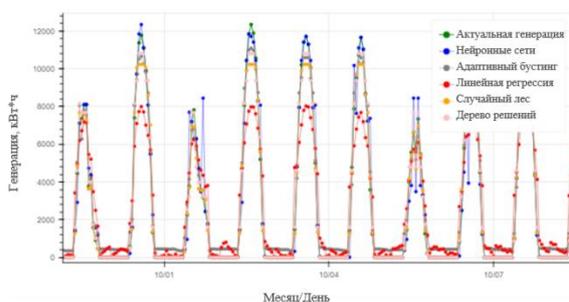


Рис. 4. Сравнение текущих и прогнозных значений генерации разными алгоритмами машинного обучения для солнечной электростанции установленной мощностью 15 МВт

Fig. 4. Comparison of current and forecast generation values by different machine learning algorithms for a solar power plant with an installed capacity of 15 MW

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Среднеквадратическая ошибка была посчитана для проверочных и тренировочных данных. Это сделано для того, чтобы проверить, насколько хорошо были подобраны параметры модели. Высокая разница между тренировочными и проверочными данными свидетельствовала бы о переобучении, а высокое значение среднеквадратической ошибки при почти минимальной разнице между тренировочными и проверочными данными свидетельствовала бы о недообучении модели. В результате расчетов были получены данные, представленные на рисунке 5. Из рисунка видно, что наименьшую среднеквадратическую ошибку на проверочных данных имеет алгоритм случайного леса.

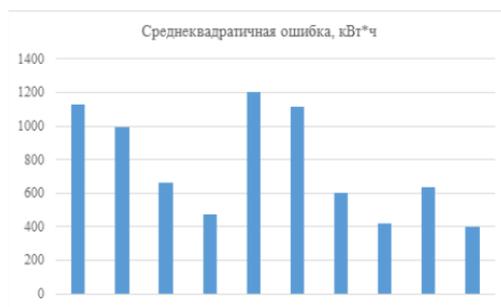


Рис. 5. Среднеквадратичные ошибки, полученные при перекрестной проверке моделей при сравнении текущих и прогнозных значений генерации разными алгоритмами машинного обучения

Fig. 5. The root-mean-square errors obtained during cross-validation of models when comparing current and predicted generation values by different machine learning algorithms. *

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для оптимизации необходимо осуществить реконфигурацию системы электроснабжения с распределенной генерацией. Топологию сети можно изменить, изменив состояние линейных выключателей. Задачей оптимизации является нахождение оптимальной радиальной топологии сети, которая минимизирует совокупные потери активной мощности.

Сформулированная проблема может быть описана следующим уравнением: [15]

$$\min \left(P_{loss} = \sum_{h=1}^{N_H} P_{loss}^h = \sum_{h=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_i} R_i \frac{(P_i^h)^2 + (Q_i^h)^2}{(U_i^h)^2} \right)$$

При следующих ограничениях:

- Соблюдение баланса активной и реактивной мощности;
- Уровни напряжения в схеме находятся в допустимом диапазоне;
- Реконфигурация распределительной сети радиальная.

Существует множество способов, с помощью которых можно оптимизировать конфигурацию распределительной сети. Одним из способов является применения алгоритма брутфорса (от английского выражения «brute force»). Идея использования алгоритма состоит в том, чтобы по очереди перебирать положения всех возможных выключателей с целью поиска оптимального положения реконфигурации сети.

В качестве исходной схемы была выбрана схема с 15-ю шинами, представленная на рисунке 6.

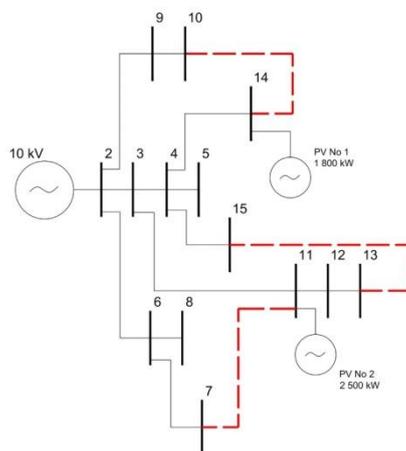


Рисунок 6. Исходная схема для оптимизации

Fig. 6. Original circuit for optimization

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Для этой схемы была составлена модель в программном обеспечении *MathWorks Matlab & Simulink*. Эта модель задавала графики нагрузок для каждой из шин и график выработки электроэнергии солнечными электростанциями. Затем модель поочередно перебирала положение всех выключателей в схеме.

Результат работы этого алгоритма представлен на рисунке 7.

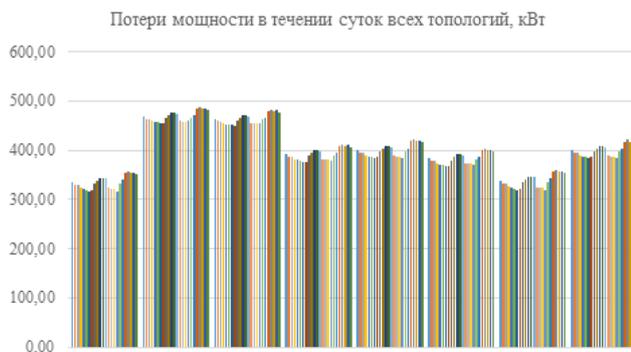


Рис. 7. Потери активной мощности для разных топологий исходной схемы

Fig. 7. Active power losses for different topologies of the original circuit

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Рассмотренный способ оптимизации подходит только для небольших схем и не масштабируется для крупных сетей. По этой причине, необходимо преобразовывать эту задачу в более простую и менее трудоемкую [12].

Заключение (Conclusions)

Точное прогнозирование солнечной фотоэлектрической мощности необходимое для оптимальной интеграции станций на возобновляемых источниках в существующие энергосистемы в супергридах и для прогноза потребления в микрогридах. В статье представлена методология прогнозирования выработки фотоэлектрических систем на сутки вперед, основанная на алгоритмах машинного обучения. Проведенный анализ построения рабочей модели машинного обучения, продемонстрировал, что для построения оптимальной модели, необходима только история выработки электроэнергии этой станции, сопоставленная с рассчитанными и измеренными данными погоды. Стабильность модели была проверена путем применения метода перекрестной проверки в различных условиях обучения и тестирования. Полученные результаты показали, что модель надежно работает, поскольку среднеквадратическая ошибка самой точной модели находится в районе 600кВт*ч (4 %).

Литература

1. Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малообеспеченных потребителей России // Векторы расчета: экономика и социум. 2012. №3 (4).
2. Сулов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных регионов России с использованием экспортных источников энергии // Вестник ИрГТУ. 2017. №5 (124).
3. International Energy Agency 2022 Renewables 2022 Analysys and Forecasts to 2023//Paris: International Energy Agency
4. Сокольникова Т.В., Сулов К.В., Ломбарди П. Расчет оптимальных параметров накопления для добычи энергии в изолированных энергосистемах с активными пользователями // Вестник ИрГТУ. 2015. №10 (105).
5. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функциональности комплексов релейной защиты и автоматики, преступлений в активно-адаптивной сети. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):102-123.
6. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В., Большев В.Е. Принципы управления конфигурацией электрической сети и задачи по их реализации. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):34-46.
7. Zatsarinnaya Y., Logacheva A., Gainullin R., et al. Solution for renewable future// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124, p.04010.
8. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Лаврик А.Ю., Булдыско А.Д. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(1):10-17.
9. Ercan I., Ahmet O., Bihter Y., Mustafa K.K., Ahmet D.S. Shortmid-term solar power prediction by using artificial neural networks, Solar Energy. 2012. Vol. 86. № 2. p. 725–733
10. Gigoni L., Betti A., Crisostomi E., et al. Day-ahead hourly forecasting of power generation from photovoltaic plants, IEEE Trans Sustain Energy, vol. 9 (2), pp. 831- 842, 2018.
11. Khan P., Byun Y., Lee S., et al. Machine learning-based approach to predict energy consumption of renewable and nonrenewable power sources, Energies, vol. 13, no. 18, p. 4870, 2020.
12. Khalyasmaa A., Eroshenko S., Tashchilin V., et al. Industry Experience of Developing Day-Ahead Photovoltaic Plant Forecasting System Based on Machine Learning, Remote Sens., vol. 12, p.3420, 2020.
13. Рамазанова Р.И., Исаева О.В. Электроснабжение отдаленных населенных пунктов с помощью ветродизельных установок// Тинчуринские чтения - 2022 "Энергетика и цифровая трансформация": Сборник статей по материалам конференции. В 3-х томах; 27–29 апреля 2022 года., Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. С. 669-671.
14. Eltamaly A., Ahmed M., Alotaibi M., et al. Performance of Communication Network for Monitoring Utility Scale Photovoltaic Power Plants, Energies, vol. 13, p. 5527, 2020.
15. Воркунов О.В., Ихсанова А.И., Гайнутдинова А.М. Оптимальная ориентация солнечных фотоэлектрических модулей в г. Казани// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. №11-12. С. 26-29.

16. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D. Machine learning techniques for short-term solar power stations operational mode planning. *E3S Web of Conferences*, vol.51, p.02004, 2018.

17. Эльмохлави А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. Оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. №21(1-2). С.43-54.

Авторы публикации

Зацаринная Юлия Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова», Казанского государственного энергетического университета E-mail: zac_jul@mail.ru.

Реутин Глеб Владимирович – ассистент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанского государственного энергетического университета E-mail: reutingleb@gmail.com.

Курилов Сергей Сергеевич – ассистент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова», Казанского государственного энергетического университета E-mail: e-assist@bk.ru.

Исаева Ольга Витальевна – магистрант, Казанского государственного энергетического университета E-mail: isaeva.olga01@mail.ru

Ковалев Георгий Сергеевич – студент, Казанского государственного энергетического университета E-mail: GSKovalev@stud.kpfu.ru

References

1. Surzhikova OA. Problemy i osnovnye napravleniya razvitiya elektrosnabzheniya udalennykh i malonaselennykh potrebitel'ei Rossii. *Bulletin of Siberian Science (Vestnik nauki Sibiri)*.2012; 4(3):103–108.

2. Suslov KV. Razvitie sistem e`lektrosnabzheniya izolirovanny`kh territorij Rossii s ispol`zovaniem vozobnovlyaemy`kh istochnikov e`nergii. *Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2017; 5:131–142.

3. International Energy Agency 2022 Renewables 2022 Analysys and Forecasts to 2023. Paris: International Energy Agency

4. Soko`lnikova TV, Suslov KV, Lombardy P. Opredelenie optimal`ny`kh parametrov nakopitelya dlya integraczii vozobnovlyaemy`kh istochnikov e`nergii v izolirovanny`kh e`nergosistemakh s aktivny`mi potrebitelyami). *Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2017; 10:206–211.

5. Vinogradov AV, Vinogradova AV, Seyfullin AYu, et al. 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.

6. Ivanov IYU, Novokreshchenov VV, Ivanova VR. Sovremennoe sostoyanie problem funkcionirovaniya kompleksov relejnoj zashchity i avtomatiki, ispol`zuemyh v aktivnoj adaptivnoj seti. *Energetika: issledovaniya, oborudovanie, tekhnologii*. 2022;24(6):102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.

7. Zatsarinnaya Y, Logacheva A, Gainullin R, et al. Solution for renewable future. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:04010. doi:10.1051/e3sconf/201912404010.

8. Lavrik AY, Zhukovsky YL, Lavrik AY, Buldysko A.D. Fatures of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):10-17. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.

9. Ercan I, Ahmet O, Bihter Y, et al. Shortmid-term solar power prediction by using artificial neural networks, *Solar Energy*. 2012;86(2):725–733.

10. Gigoni L, Betti A, Crisostomi E., et al. Day-ahead hourly forecasting of power generation from photovoltaic plants. *IEEE Trans Sustain Energy*. 2018;9(2):831-42. doi: 10.1109/TSTE.2017.2762435.

11. Khan P, Byun Y, Lee S, et al. Machine learning-based approach to predict energy consumption of renewable and nonrenewable power sources. *Energies*. 2020;13(18):4870. doi:

10.3390/en13184870.

12. Khalyasmaa A., Eroshenko S., Tashchilin V., et al. Industry Experience of Developing Day-Ahead Photovoltaic Plant Forecasting System Based on Machine Learning. *Remote Sens.* 2020;12:3420. doi: 10.3390/rs12203420.

13. Ramazanova RI., Isaeva OV., Elektrosnabzhenie ot dalennykh naselennykh punktov s pomoshch'yu vetrodizel'nykh ustanovok. *Tinchurinskie chteniya - 2022 "Energetika i cifrovaya transformatsiya": Sbornik statej po materialam konferencii. In 3 tomah; 27–29 Apr 2022 goda; Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2022. pp. 669-671.*

14. Eltamaly A, Ahmed M, Alotaibi M, et al. Performance of Communication Network for Monitoring Utility Scale Photovoltaic Power Plants. *Energies.* 2020;13:5527. doi: 10.3390/en13215527.

15. Vorkunov OV, Ikhsanova AI., Gainutdinova AM. Optimum orientation of solar pv modules in kazan. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2015;(11-12):26-29. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-11-12-26-29.

16. Eroshenko S, Khalyasmaa A, Snegirev D. Machine learning techniques for short-term solar power stations operational mode planning. *E3S Web of Conferences.* 2018; 51:02004. doi: 10.1051/e3sconf/20185102004.

17. Lukutin BV, Karrar Hameed K. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.

Authors of the publication

Yuliya N. Zatsarinnaya – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Gleb V. Reutin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergey S. Kurilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia..

Olga V. Isaeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

George S. Kovalev – Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика.

Получено 28.02.2023 г.

Отредактировано 18.04.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Логунов А.В.¹, Шлык Ю.К.²

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

¹ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-3735-7877>,

logunovav97@mail.ru, ²shlyk53@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Задача оперативного и точного определения места повреждения (ОМП) в кабельных линиях электропередачи является одной из ключевых в процессе обеспечения надежного и бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией. Разработка нового алгоритма решения этой задачи, который позволит минимизировать время и ресурсы, затрачиваемые на поиск повреждений, является актуальным направлением современных исследований. ЦЕЛЬ. Рассмотреть основные недостатки и ограничения существующих методов ОМП кабельных линий. Разработать алгоритм ОМП кабельной линии на основе теории длинных линий с использованием оригинальных амплитудно-фазовых координатных характеристик. Реализовать алгоритм получения теоретических характеристик зависимости параметров входного тока от координаты повреждения линии на конкретном числовом примере. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись методы теории длинных линий и классической теории электрических цепей, реализованные средствами программного комплекса Wolfram Mathematica. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены основные недостатки существующих методов ОМП кабельных линий. Разработан и на конкретном числовом примере реализован алгоритм определения места повреждения для однофазной кабельной линии, основанный на совместном использовании специального вида дублированных координатно-зависимых (АКХ) и (ФКХ) характеристик, рассчитанных с использованием программного комплекса Wolfram Mathematica. Приведены соответствующие графические построения и описан вариант практической реализации предлагаемого алгоритма. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. По результатам теоретических расчетов предложенный алгоритм определения места повреждения однофазной кабельной линии электропередачи позволяет с заданной точностью определять координату повреждения для случаев обрыва и короткого замыкания во всем диапазоне длины линии. Полученные теоретические расчеты нуждаются в соответствующей экспериментальной проверке на следующем этапе исследований.

Ключевые слова: моделирование; место повреждения линии; алгоритм; кабельная линия; амплитудно-фазовая координатная характеристика.

Для цитирования: Логунов А.В., Шлык Ю.К. Разработка алгоритма определения места повреждения кабельной линии с использованием ее амплитудно-фазовых координатных характеристик // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. №. С.93-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-93-104.

DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR DETERMINATION OF LOCATION OF CABLE LINE DAMAGE USING ITS AMPLITUDE-PHASE COORDINATE CHARACTERISTICS

AV. Logunov¹, YuK. Shlyk²

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3735-7877>,

logunovav97@mail.ru²shlyk53@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. The task of prompt and accurate determination of the fault location in cable transmission lines is one of the key in the process of ensuring a reliable and uninterrupted

supply of electricity to consumers. The development of a new algorithm for solving this problem, which will minimize the time and resources spent on finding damage, is an urgent area of modern research. **THE PURPOSE.** Consider the main shortcomings and limitations of the existing methods of determining fault location to cable lines. Develop an algorithm for the determining fault location to cable line based on the theory of long lines using the original amplitude-phase coordinate characteristics. Implement an algorithm for obtaining theoretical characteristics of the dependence of the input current parameters on the line fault coordinate using a specific numerical example. **METHODS.** When solving the tasks set, the methods of the theory of long lines and the classical theory of electrical circuits were used, implemented by means of the Wolfram Mathematica software package. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the main shortcomings of the existing methods of determining fault location to cable lines. An algorithm for determining the fault location for a single-phase cable line has been developed and implemented on a specific numerical example, based on the joint use of a special type of duplicated coordinate-dependent (ACC) and (FCC) characteristics calculated using the Wolfram Mathematica software package. The corresponding graphic constructions are given and a variant of the practical implementation of the proposed algorithm is described. **CONCLUSION.** According to the results of theoretical calculations, the proposed algorithm for determining the location of damage to a single-phase cable power transmission line allows, with a given accuracy, to determine the coordinate of damage for cases of breakage and short circuit in the entire range of line length. The obtained theoretical calculations need appropriate experimental testing in the next stage of research.

Key words: modeling; the location of the line failure; algorithm; cable line; amplitude-phase coordinate characteristic.

For citation: Logunov AV, Shlyk YuK. Development of algorithm for determination of location of cable line damage using its amplitude-phase coordinate characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):93-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-93-104.

Введение (Introduction)

Эффективность работы любых электротехнических комплексов неразрывно связана с бесперебойной поставкой электроэнергии к потребителям, которая осуществляется по кабельным или воздушным линиям электропередачи.

Всякое нарушение целостности линии, вызванное тем или иным видом повреждения, неизбежно отразится на режиме работы всего комплекса [1].

При такой проблеме основной задачей эксплуатирующей сетевой организации является максимально быстрое и точное определение места повреждения (ОМП) электрической линии, чтобы исключить длительный перерыв нормального электроснабжения потребителей и минимизировать сопутствующие убытки.

Цель исследования: разработать алгоритм ОМП кабельной линии, основанный на использовании зависимостей параметров входного тока от координаты повреждения линии, который обеспечит необходимую точность и достоверность результатов. Научная значимость исследования заключается в разработке нового алгоритма, базирующегося на использовании оригинальных амплитудно-фазовых координатных характеристик в рамках теории длинных линий. Практическая значимость результатов исследования определяется возможностью их использования в качестве универсального подхода к решению задачи ОМП кабельных линий для случаев обрыва и короткого замыкания, что подтверждается расчетом числового примера.

Литературный обзор (Literature Review)

Арсенал современных методов и средств определения места повреждения электрических линий весьма разнообразен. В их числе можно назвать такие дистанционные методы, как: импульсный, петлевой, метод колебательного разряда, емкостной и волновой [2-7].

Самостоятельную группу образуют топографические методы, к которым относятся: потенциальный, индукционный и акустический.

Все эти методы имеют сугубо экспериментальный характер. Их целью является определение координаты места повреждения линии, однако достигается она опосредовано, через измерение других величин, причем не электрической природы.

К примеру, в импульсном и волновом методах измеряемой величиной является время [8, 9]. В емкостном методе измеряют емкость оборванных жил кабеля, а в петлевом – их электрическое сопротивление [10-13].

Все эксперименты, которые проводятся в рамках реализации названных методов являются, как правило, сложно организованными, поскольку они осуществляются с учетом выполнения различного рода особых условий, таких как электрический пробой изоляции в методе колебательного разряда, или ограничений, которые накладываются на величину переходного сопротивления в месте повреждения при использовании емкостного метода [7].

Топографические методы вообще имеют особый статус, поскольку применяются в полевых условиях и могут использоваться для уточнения координаты места повреждения, предварительно определенной тем или иным методом дистанционной группы. При этом поиск повреждения на трассе прокладки кабеля осуществляется с использованием специализированной контрольно-измерительной аппаратуры промышленного производства [14].

Из всего сказанного можно сделать вывод о том, что существующие на сегодня методы не свободны от недостатков. В числе главных выделим сложность технической реализации и невысокую точность в определении места повреждения линии, которая в ряде случаев компенсируется совместным использованием двух и более методов одновременно [15-17].

Данное обстоятельство является основанием для разработки принципиально иного подхода к решению этой проблемы, в котором главенствующая роль будет отводиться теоретическим разработкам модели электрической линии с повреждением. Классическим примером модели такого рода может считаться линия с распределенными параметрами, в которой произошло нарушение однородности ее структуры¹.

Материалы и методы (Materials and methods)

Поставим задачу определения входного тока линии, находящейся в режиме холостого хода или короткого замыкания, с последующим уменьшением длины l (рис. 1), которое будет обусловлено возникновением этих предельных режимов в том или ином ее сечении X .

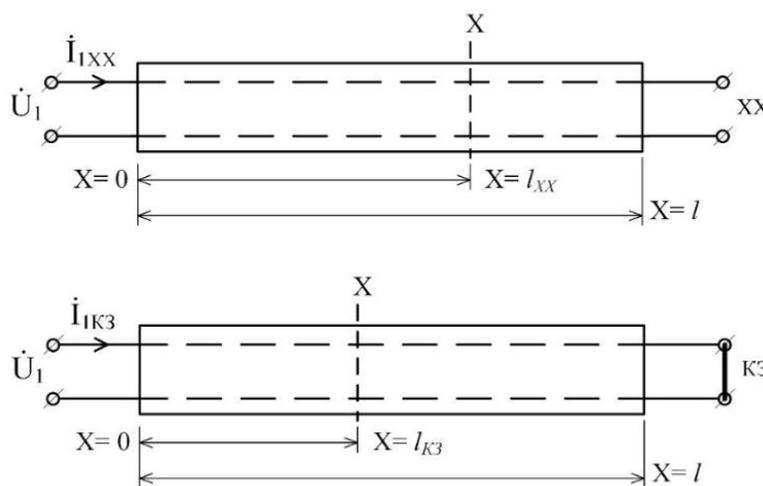


Рис. 1. Режимы холостого хода и короткого замыкания линии. X – координата возможного места повреждения, \dot{I}_{1XX} и $\dot{I}_{1KЗ}$ – комплексные токи линии в режимах холостого хода и короткого замыкания соответственно*

Fig. 1. Open circuit and short circuit modes. X - is the coordinate of the possible damage site, \dot{I}_{1XX} and $\dot{I}_{1KЗ}$ - are the complex currents of the line in the idle and short circuit modes, respectively*

*Made by the author

*Разработано автором

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

¹ Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

Указанные соотношения для комплексных токов \dot{I}_{1XX} и \dot{I}_{1K3} неповрежденной линии примут вид:

$$\dot{I}_{1XX} = \frac{\dot{U}_1}{Z_\epsilon \cdot \text{cth}(\gamma l)}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1K3} = \frac{\dot{U}_1}{Z_\epsilon \cdot \text{th}(\gamma l)} \quad (2)$$

где $\dot{U}_1 = U_{1m} e^{j\psi_u}$;

U_{1m} - амплитуда синусоидального источника напряжения, питающего линию;

ψ_u - начальная фаза напряжения;

$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ - волновое сопротивление линии;

R_0, L_0, C_0, G_0 - сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость единицы длины линии;

$j = \sqrt{-1}$;

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота источника напряжения;

f - его частота в [Гц];

th и cth - гиперболические функции тангенс и котангенс;

$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)}$ - постоянная распространения линии.

Очевидно, что путем замены постоянной l , входящей в формулы (1) и (2), на переменную координату возможного места повреждения $0 < X \leq l$, можно получить соответствующие комплексные функции токов $\dot{I}_{1XX}(jX)$ и $\dot{I}_{1K3}(jX)$:

$$\dot{I}_{1XX}(jX) = I_{1mXX}(X) \cdot e^{j\psi_{iXX}^{(1)}(X)} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1K3}(jX) = I_{1mK3}(X) \cdot e^{j\psi_{iK3}^{(1)}(X)} \quad (4)$$

где $I_{1mXX}(X)$ и $I_{1mK3}(X)$ – амплитудно-координатные (АКХ) характеристики;

$\psi_{iXX}^{(1)}(X)$ и $\psi_{iK3}^{(1)}(X)$ – фазо-координатные (ФКХ) характеристики – соответственно.

По существу функции (3) и (4) являются амплитудно-фазовыми координатными (АФКХ) характеристиками линии с повреждением, которые можно рассматривать в качестве эквивалента общеизвестных (АФЧХ) характеристик [18], являющихся базовым инструментом исследования сложных технических систем.

В рамках рассматриваемой задачи (АФКХ) характеристики позволяют установить взаимосвязь между параметрами входного тока линии и координатой места ее возможного обрыва или короткого замыкания.

Результаты (Results)

Реализуемость предлагаемого алгоритма определения места повреждения линии, покажем на конкретном числовом примере.

Для этого рассмотрим некоторую условную кабельную линию длиной $l = 10$ км со среднестатистическим погонными параметрами: $R_0 = 20,5$ Ом/км; $L_0 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $C_0 = 35,2 \cdot 10^{-9}$ Ф/км и $G_0 = 0,7 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Задав параметры источника напряжения: $U_{1m} = 10$ В, $\psi_u = 0^\circ$ и $f = 20 \cdot 10^3$ Гц, произведем расчет (АФКХ) характеристик (3) и (4), используя программный комплекс *Wolfram Mathematica*.

Результаты приведены на рисунках 2 и 3.

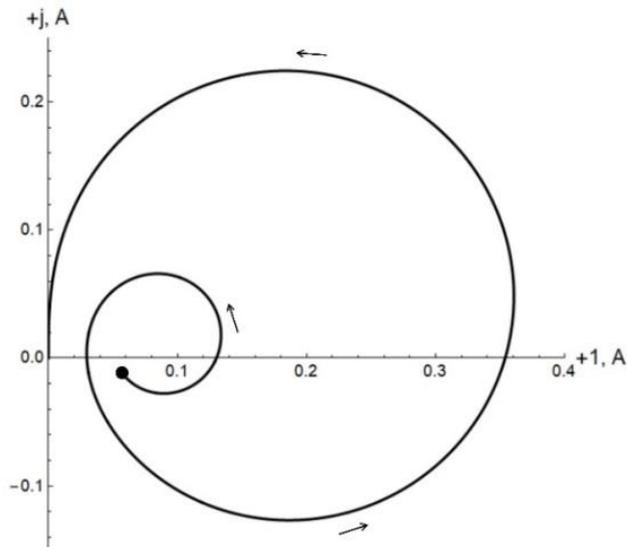


Рис. 2. (АФКХ)_{ХХ} характеристика*

Fig. 2. (APhCC)_{DL} characteristic*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

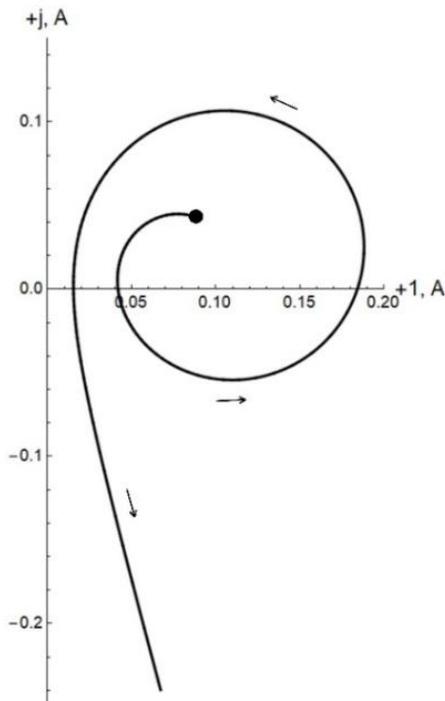


Рис. 3. (АФКХ)_{КЗ} характеристика

Fig. 3. (APhCC)_{ST} characteristic

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На данном этапе исследования сузим поставленную выше задачу и ограничимся ее решением применительно к режиму холостого хода (обрыву) линии. Для этого перейдем от комплексной (АФКХ)_{ХХ} по рис. 2 к координатно зависимым (АКХ) и (ФКХ) характеристикам.

Соответствующие графики даны на рисунках 4 и 5.

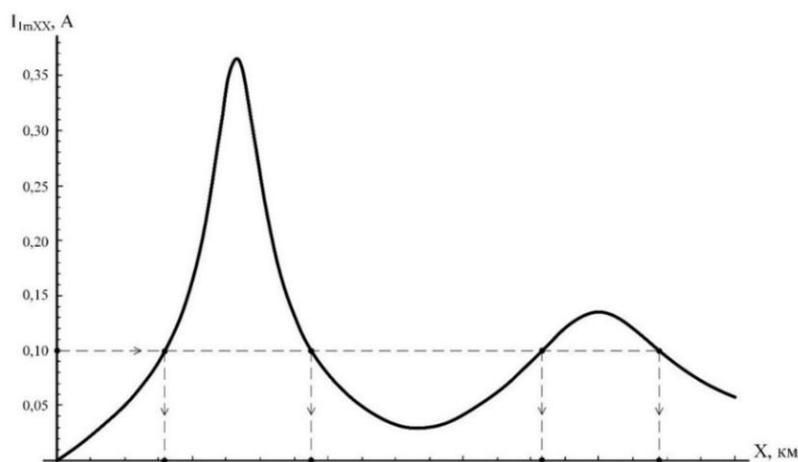


Рис. 4. $(AKX)_{XX}$ характеристика

Fig. 4. $(ACC)_{IDL}$ characteristic

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

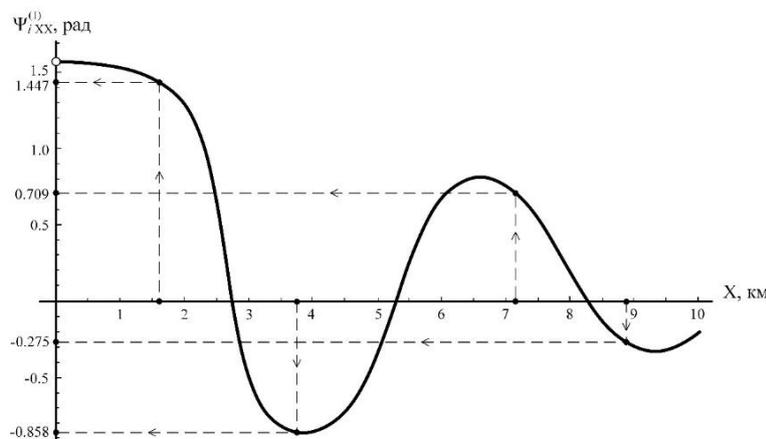


Рис. 5. $(ФКX)_{XX}$ характеристика

Fig. 5. $(PhCC)_{IDL}$ characteristic

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Из представленных зависимостей очевидна взаимосвязь параметров входного тока линии (I_{1mXX} и $\psi_{iXX}^{(1)}$) и координаты повреждения (X). Однако, в силу периодичности данных функций эта взаимосвязь неоднозначна.

К примеру, для $I_{1mXX} = 0,1$ А (рис. 4) координаты X примут значения: 1596; 3759; 7157 и 8895 метров, а для этих же X начальные фазы $\psi_{iXX}^{(1)}$ будут: 1,447; - 0,858; 0,709 и - 0,275 радиан соответственно (рис. 5).

Необходимо отметить, что $\psi_{iXX}^{(1)}$ определяет характер нагрузки линии, т.е. угол φ , который определяется по соотношению:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -\psi_i \quad (5)$$

учитывая ранее принятое значение $\psi_u = 0$.

Таким образом, знакопеременность $\psi_{iXX}^{(1)}(X)$ делает неоднозначным и характер нагрузки линии относительно зажимов источника.

Причина периодичности функций $I_{1mXX}(X)$ и $\psi_{iXX}^{(1)}(X)$ объясняется тем, что физическая длина линии существенно превышает длину волны тока и напряжения λ , которая может быть определена по формуле:

$$\lambda = \frac{V_\phi}{f}, \quad (6)$$

где V_ϕ - фазовая скорость распространения волн тока и напряжения в линии.

Из сказанного следует, что проблему неоднозначности функций $(AKX)_{XX}$ и $(ФКX)_{XX}$ можно решить путем подбора соответствующей частоты источника напряжения. Она должна быть такой, чтобы соответствующая ей длина волны по формуле (6) в 4 раза превышала физическую длину линии. В нашем случае ее значение составит $\lambda = 40$ км.

Задаваясь средним значением $v_\phi = 1,7 \cdot 10^5$ км/с для кабельных линий², определим верхнее значение частоты источника, которое будет равняться $f = 4250$ Гц.

Приняв к дальнейшему расчету $f = 4000$ Гц, построим для нее новые $(AKX)_{XX}$ и $(ФКX)_{XX}$ - характеристики, которые приведены на рисунке 6.

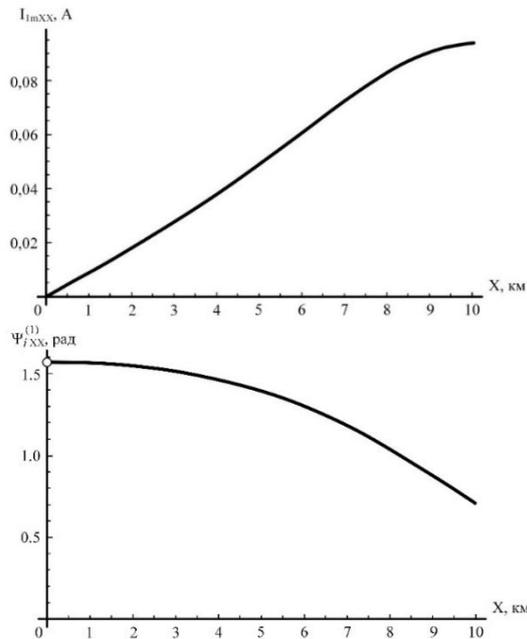


Рис. 6. $(AKX)_{XX}$ и $(ФКX)_{XX}$ характеристики при $f = 4000$ Гц

Fig. 6. $(ACC)_{IDL}$ and $(PhCC)_{IDL}$ characteristics at $f = 4000$ Hz

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Используя тот же алгоритм решения, построим $(AKX)_{K3}$ и $(ФКX)_{K3}$ характеристики применительно к режиму короткого замыкания линии. Их вид представлен на рисунке 7.

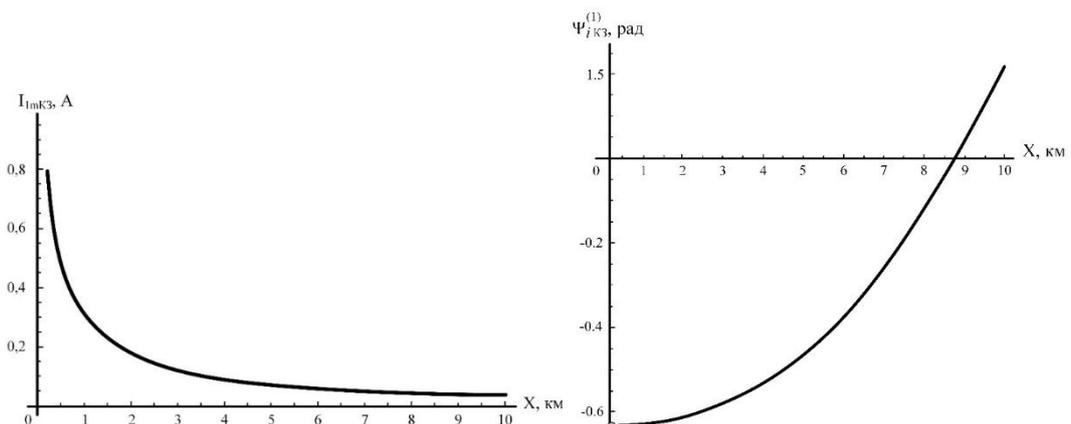


Рис. 7. $(AKX)_{K3}$ и $(ФКX)_{K3}$ характеристики при $f = 4000$ Гц

Fig. 7. $(ACC)_{SCT}$ and $(PhCC)_{SCT}$ characteristics at $f = 4000$ Hz

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При практической реализации предложенного алгоритма линию с повреждением подключают к синусоидальному генератору напряжения с расчетными значениями U_m и f . Далее производят измерение амплитуды входного тока линии I_{1m} и ее угла ϕ_1 с

² Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

использованием, например, виртуального комплекса National Instruments Elvis II, а затем по характеристикам рис. 6 или рис. 7 определяют искомую координату места повреждения X .

Важно отметить, что совместное использование (АКХ) и (ФКХ) характеристик повышает достоверность в определении координаты X , поскольку ее расчетное значение будет продублировано результатами одновременного измерения тока I_{1m} и угла φ_1 на входе линии.

Обсуждение (Discussions)

И все же, предложенный алгоритм имеет один существенный, на наш взгляд, недостаток. Речь идет о регистрации токов на входе линии в области малых значений X . Причем это касается обоих видов повреждений.

При $X \rightarrow 0$ входные токи будут стремиться к своим предельным значениям $I_{1mXX} \rightarrow 0$; $I_{1mK3} \rightarrow \infty$, что создает очевидные проблемы в плане точности их измерения на практике.

Данную сложность можно преодолеть, если к уже имеющимся I_{1mXX} и I_{1mK3} добавить регистрацию токов на выходе линии I_{2mXX} и I_{2mK3} .

Это легко реализовать путем подключения генератора напряжения с теми же U_m и f к выходным зажимам линии.

Такой подход позволил построить вторые ветви (АКХ) и (ФКХ) характеристик, которые зеркально расположены относительно оси, проходящей через координату середины линии. Их расчет был произведен с использованием того же программного комплекса *Wolfram Mathematica*.

Результаты приведены на рисунках 8 и 9.

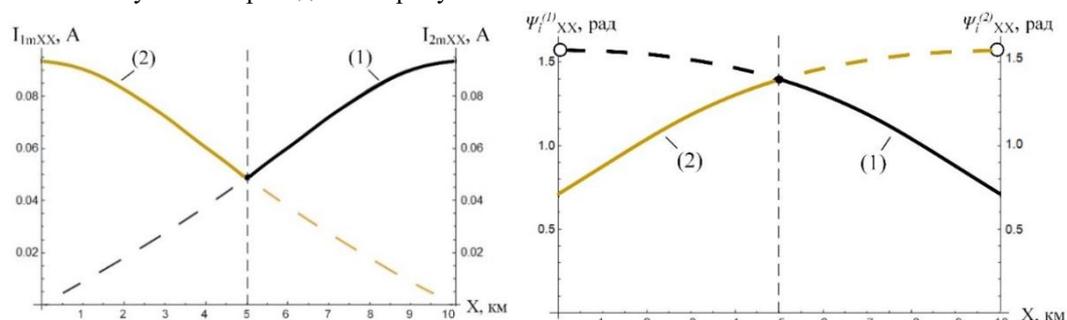


Рис. 8. Дублированные (АКХ)_{XX} и (ФКХ)_{XX} характеристики:

- (1) – характеристики, полученные при подключении генератора в начале линии;
- (2) – характеристики, полученные при подключении генератора в конце линии

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Fig. 8. Duplicated (ACC)_{IDL} and (PhCC)_{IDL} characteristics:

- (1) - characteristics obtained by connecting the generator at the beginning of the line;
- (2) - characteristics obtained by connecting the generator at the end of the line

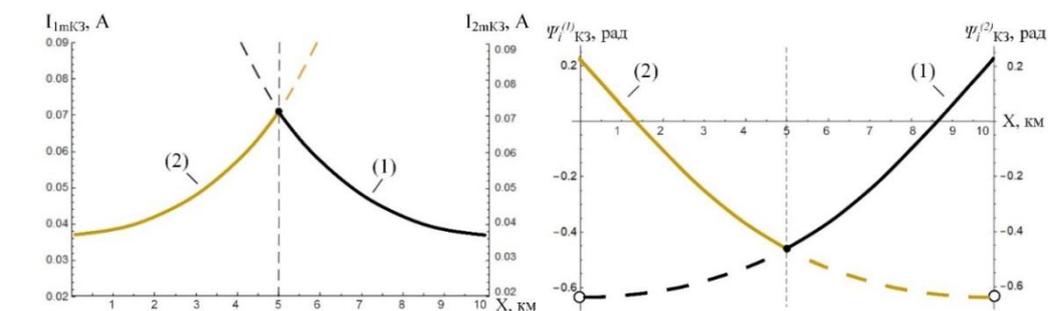


Рис. 9. Дублированные (АКХ)_{K3} и (ФКХ)_{K3} характеристики:

- (1) – характеристики, полученные при подключении генератора в начале линии;
- (2) – характеристики, полученные при подключении генератора в конце линии

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Fig. 9. Duplicated (ACC)_{SCT} and (PhCC)_{SCT} characteristics:

- (1) - characteristics obtained by connecting the generator at the beginning of the line;
- (2) - characteristics obtained by connecting the generator at the end of the line

Из графиков очевидно, что величина изменения токов и их начальных фаз лежит в ограниченном диапазоне. Это дает основание считать, что в ходе проведения экспериментальных исследований они могут быть измерены с заданной степенью точности,

которая будет определяться классом точности средств измерения параметров линии на входе.

При этом вопрос принадлежности параметра к той или иной характеристике решается следующим образом: проводится измерение тока I_m и угла φ при подключении генератора в начале линии (характеристика 1), и в случае получения значения, лежащего вне зоны чувствительности измерительного комплекса, производится аналогичный замер в конце линии, что позволяет определить координату X по характеристике 2.

Базовый вариант блок-схемы предложенного алгоритма представлен на рисунке 10.

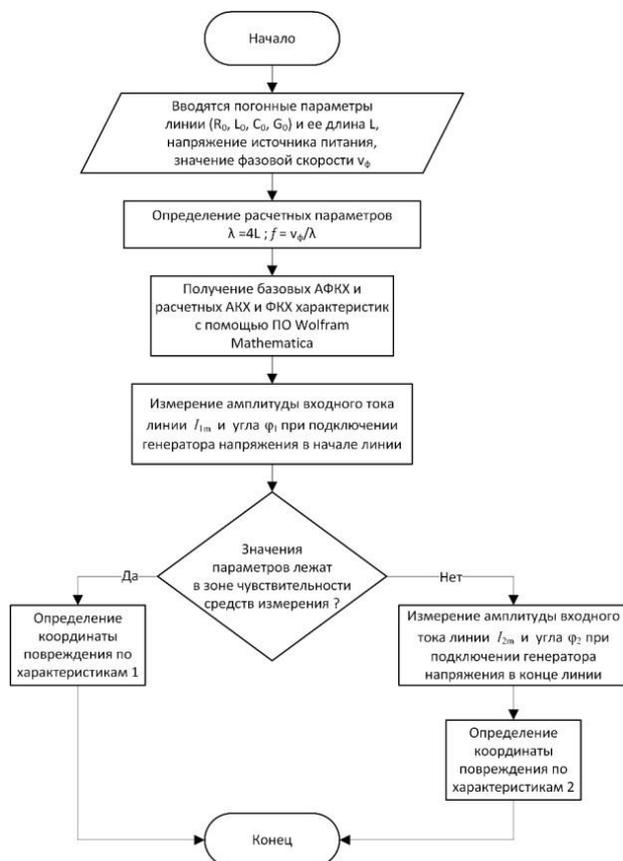


Рис. 10. Блок-схема предложенного алгоритма определения места повреждения кабельной линии Fig. 10. Block diagram of the proposed algorithm for determining the location of damage to the cable line

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Заключение (Conclusion)

На основе классической теории длинных линий получены специального типа комплексные функции зависимости параметров входного тока кабельной линии от координаты ее повреждения.

Предложен алгоритм определения места повреждения однофазной кабельной линии электропередачи, основанный на совместном использовании специального вида дублированных координатно-зависимых (АКХ) и (ФКХ) характеристик, рассчитанных с использованием программного комплекса Wolfram Mathematica.

Возможность реализации предложенного алгоритма протестирована на конкретном числовом примере для случаев обрыва и короткого замыкания некоторой условной однофазной кабельной линии. Выявлено, что по построенным графикам можно однозначно определить точную координату места повреждения линии, за исключением области предельных значений параметров тока в начале линии.

Для обеспечения заданной точности определения координаты повреждения во всем диапазоне длины линии предложено использование метода двухсторонних измерений и совместное использование полученных в результате этого характеристик.

Полученные теоретические расчеты нуждаются в соответствующей экспериментальной проверке, что станет предметом дальнейших исследований.

Литература

1. Виноградов А. В. Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей / А. В. Виноградов, Р. А. Перьков // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 12(55). – С. 12-21.
2. Основные методы определения мест повреждения (ОМП). Режим доступа: <https://angstremip.ru/blog/492/>.
3. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / М: НТФ «Энергопресс», 1998. 87 с.
4. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 16-21. – doi 10.17588/2072-2672.2016.5.016-021.
5. Saha, M., Izykowski, J. and Rosolowski, E., Fault location on power networks, Springer, London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-886-5.
6. Yi Sun et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 696 012047.
7. H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, Advances in Transmission Network Fault Location in Modern Power Systems: Review, Outlook and Future Works, in IEEE Access, vol. 9, pp. 158599-158615, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129838.
8. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г. М. Шалыт // М. : «Энергия», 1968. – 216 с.
9. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи / А. И. Федотов, Г.В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов, А. М. Шаряпов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 146-155. doi 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155.
10. Bukvisova, Z., Orsagova, J., Topolanek, D. & Toman, P. 2019, Two-terminal algorithm analysis for unsymmetrical fault location on 110 kV lines, Energies, vol. 12, no. 7. doi: 10.3390/en12071193.
11. Dian Lu, Yu Liu, Dayou Lu, Binglin Wang, Xiaodong Zheng, Unsynchronized fault location on untransposed transmission lines with fully distributed parameter model considering line parameter uncertainties, Electric Power Systems Research, Volume 202, 2022, 107622.
12. Hafizi Bin Idris, M. (2020). Combination effects of fault resistance and remote in feed current on simple impedance based fault location. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1432(1) doi:10.1088/1742-6596/1432/1/012002.
13. N. Cifuentes and B. C. Pal, A New Approach to the Fault Location Problem: Using the Fault's Transient Intermediate Frequency Response, in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 510-521, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3089678.
14. Авдеева, К. В. Анализ топографических методов определения мест повреждения изоляции кабеля / К. В. Авдеева, Ю. М. Елизарова // Приднепровский научный Вестник. 2019. Т. 7. № 2. С. 37-40.
15. Кучерявенков А.А., Рукавицын А.А., Феоктистов А.В., и др. Способ определения места повреждения кабельных и воздушных линий электропередач // Патент РФ № 2733825. 2020. Бюл. №28.
16. Эрекайкин, Е. И. Методика определения мест повреждения кабельных линий в распределительных электрических сетях 10 кВ / Е. И. Эрекайкин, Д. В. Армеев, Я. А. Фролова // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018: Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. Том 2. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 166-169.
17. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Сидоренко В.С., Гайдамашко А. И. Перспективный способ повышения точности определения мест повреждения кабельных линий электропередачи и устройство по его реализации // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер: Естественно-математические и технические науки. 2020. № 3(266). С. 52-58.
18. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системам. Москва: «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 1993. 492 с.

Авторы публикации

Логунов Андрей Владимирович – аспирант, Тюменский индустриальный университет.

Шлык Юрий Константинович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет.

References

1. Vinogradov A.V., Per'kov R.A. Analysis of damage to electrical equipment of electrical networks and justification of measures to improve the reliability of power supply to consumers. *Vestnik NGIEI* [Bulletin NGIEI], 2015, no. 12(55), pp. 12-21.
2. Basic methods for determining damage locations (OMP). Available at: <https://angstremip.ru/blog/492/> (accessed 1 March 2023).
3. Arzhannikov E.A., Chukhin A.M. *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi* [Methods and devices for determining the location of damage on power lines]. Moscow, NTF «Energopress» Publ., 1998. 87 p.
4. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Determining the location of damage to a power line by instantaneous values of oscillograms of emergency events. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 16-21. doi:10.17588/2072-2672.2016.5.016-021
5. Saha, M., Izykowski, J. and Rosolowski, E., Fault location on power networks, Springer, London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-886-5.
6. Yi Sun et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 696 012047.
7. H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand and H. Mehrjerdi, Advances in Transmission Network Fault Location in Modern Power Systems: Review, Outlook and Future Works in IEEE Access. 2021;9:158599-158615, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129838.
8. Shalyt G.M. *Opređenje mest povrezhdeniya linii elektroperedachi impul'snymi metodami* [Determination of damage points of power transmission lines by pulse methods]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 216 p.
9. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharyapov A.M. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):146-155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>.
10. Bukvisova Z, Orsagova J, Topolanek D. & Toman, P. 2019, «Two-terminal algorithm analysis for unsymmetrical fault location on 110 kV lines», *Energies*. V. 12, no. 7. doi: 10.3390/en12071193.
11. Dian Lu, Yu Liu, Dayou Lu, et al. Unsynchronized fault location on untransposed transmission lines with fully distributed parameter model considering line parameter uncertainties, *Electric Power Systems Research*, Volume 202, 2022, 107622.
12. Hafizi Bin Idris, M. (2020). Combination effects of fault resistance and remote in feed current on simple impedance based fault location. *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series*, 1432(1) doi:10.1088/1742-6596/1432/1/012002.
13. N. Cifuentes and B. C. Pal, A New Approach to the Fault Location Problem: Using the Fault's Transient Intermediate Frequency Response, in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 510-521, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3089678.
14. Avdeeva KV, Elizarova YuM. Analysis of topographic methods for determining cable insulation damage sites. *Pridneprovskiy nauchniy vestnik* [Pridneprovsky scientific bulletin], 2019;7(2):37-40.
15. Kucheryavenkov AA, Rukavitsyn AA, Feoktistov AV, et al. *Sposob opredeleniya mesta povrezhdeniya kabel'nykh i vozduzhnykh liniy elektroperedach* [Method for determining the location of damage to cable and overhead power lines]. Patent RF, no. 2733825, 2020.
16. Erekaikin EI, Armeev DV, Frolova YaA. Methodology for determining the locations of damage to cable lines in distribution electrical networks 10 kV. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: Materialy IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. V 3-kh tomakh, Kazan', 01-05 oktyabrya 2018 goda. Otv. Redactor E.V. Shamsutdinov. Tom 2.* [Power industry through the eyes of youth - 2018: Materials of the IX International Youth Scientific and Technical conferences. In 3 volumes, Kazan, October 01–05, 2018. Managing editor E.V. Shamsutdinov. V.2]. Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2018, pp. 166-169.
17. Kashin YaM, Kirillov GA, Sidorenko VS, et al. A promising method for improving the accuracy of determining the location of damage to cable power lines and a device for its implementation. *Vestnik Adygeiskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Estesstvenno-*

matematicheskie i tekhnicheskie nauki [The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences], 2020, no. 3(266), pp. 52-58.

18.Solodovnikov VV, Plotnikov VN, Yakovlev AV. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami [Theory of automatic control for the technical systems], Moscow, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 1993. 492 p.

Authors of the publication

Andrei V. Logunov – graduate student of the Department of Electric Power Engineering, FSBEI HE Tyumen Industrial University.

Yuri K. Shlyk – Dr. Tech. sciences, associate professor, professor of the Department of Electric Power Engineering, FSBEI HE «Tyumen Industrial University.»

Шифр научной специальности: 2.4.3 «Электроэнергетика»

Смежные специальности в рамках группы научной специальности: 2.4.2, 2.4.1

Получено 25.04.2023 г.

Отредактировано 23.05.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.928.93/ JEL code L94

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116

СНИЖЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ

Мостовенко Л.В.¹, Белоглазов В.П.²

Нижевартовский государственный университет, г. Нижевартовск, Россия

¹ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0675-0622>, teploblv@mail.ru

²ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3263>, vpbn@mail.ru

Резюме: Актуальность темы исследования обусловлена существованием экологической проблемы, связанной с вредными выбросами в атмосферу. Наиболее высокоэффективными являются электрофильтры и тканевые фильтры (~90-99,5% улавливания). На фоне данных аппаратов инерционные отстают и по своей эффективности улавливания и по спектру улавливания гранулометрического состава золы. Исследования, проводимые в статье направлены на создание такого инерционного аппарата, который бы обладал как минимальным сопротивлением, так и высокой эффективностью.

ЦЕЛЬ. Рассмотреть возможность снижения аэродинамического сопротивления путем изменения конструкции аппарата, а именно, увеличением диаметра входного патрубка в инерционно-вакуумном золоуловителе. Рассмотреть ряд иных способов по дальнейшему снижению аэродинамического сопротивления аппарата. Выявить перспективность и оценку капитальных затрат на реконструкцию золоулавливающего аппарата. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся метод расчета динамики дисперсного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе, реализованный МКР. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены результаты численного расчета. Произведен расчет влияния граничных условий, в число которых входит скорость потока на входе, тепловые и гидравлические параметры потока уходящих газов на входе в золоуловитель, по отношению к искомому перепаду давлений на аппарате, а также эффективности улавливания. В данной статье описан процесс, вследствие которого происходит изменение гидравлических характеристик вдоль проточной части ИВЗ. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Изменение конструкции аппарата ведет к уменьшению сопротивления ИВЗ, при этом данные изменения крайне чувствительны к влиянию на степень очистки. Расчеты показали, что данный способ оправдывает себя с точки зрения снижения сопротивления. Перепад давления колеблется в диапазоне 279,8-1273 мм. вод. ст. Сходимость итерационного расчета, с учетом качества сетки, обеспечивают гибкость, достигается меньшим количеством итераций, однако временные затраты на расчет меньше не становятся.

Ключевые слова: инерционно-вакуумный золоуловитель; снижение сопротивления; аэродинамическое сопротивление; аэродисперсный поток; высокая степень очистки; запыленный поток; численное моделирование.

Для цитирования: Мостовенко Л.В., Белоглазов В.П. Снижение аэродинамического сопротивления инерционно-вакуумного золоуловителя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. №. С. 105-116. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116.

REDUCTION OF AERODYNAMIC RESISTANCE OF INERTIAL-VACUUM ASH COLLECTOR

Mostovenko LV.¹, Beloglazov VP.²

Nizhnevartov State University, Nizhnevartovsk, Russia

¹ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0675-0622>, teploblv@mail.ru

²ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3263>, vpbn@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the research topic is due to the existence of an environmental problem associated with harmful emissions into the atmosphere. The most highly efficient are electrostatic precipitators and fabric filters (~90-99.5% capture). Against the background of these devices, inertial one's lag behind both in terms of their catching efficiency and the catching spectrum of the ash particle size distribution. The research carried out in the article is aimed at creating such an inertial apparatus that would have both minimal resistance and high efficiency.

PURPOSE. Consider the possibility of reducing aerodynamic resistance by changing the design of the device, namely, by increasing the diameter of the inlet pipe in the inertial-vacuum ash collector. Consider a number of other ways to further reduce the aerodynamic drag of the apparatus. To identify the prospects and assessment of capital costs for the reconstruction of the ash collector. **METHODS.** When solving the problem, the method for calculating the dynamics of a dispersed flow in an inertial-vacuum ash collector, implemented by the MFD, was used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the results of a numerical calculation. The calculation of the influence of boundary conditions, which include the flow rate at the inlet, thermal and hydraulic parameters of the flow of exhaust gases at the inlet to the ash catcher, in relation to the desired pressure drop across the apparatus, as well as the collection efficiency, was made. This article describes the process that results in a change in the hydraulic characteristics along the flow part of the IVAC. **CONCLUSION.** A change in the design of the apparatus leads to a decrease in the resistance of the IVAC, while these changes are extremely sensitive to the effect on the degree of purification. Calculations have shown that this method justifies itself in terms of reducing resistance. The pressure drops ranges from 279.8-1273 mm. water. pr. The convergence of the iterative calculation, taking into account the quality of the grid, provides flexibility, is achieved by fewer iterations, but the time spent on the calculation does not decrease.

Keywords: inertial vacuum ash collector; resistance reduction; aerodynamic drag; aerodisperse flow; high degree of purification; laden flow; numerical simulation.

For citation: Mostovenko LV., Beloglazov VP. Development of algorithm for determination of location of cable line damage using its amplitude-phase coordinate characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):105-116. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-105-116.

Введение

Данная проблема впервые возникла при проведении натурального эксперимента на ТЭЦ-4 города Омска. Аппарат вследствие наличия большого сопротивления не мог пропускать проектное количество расхода газов. Исходя из проведенной хоз. договорной работы на одном из этапов было принято усовершенствовать установку до аппарата с максимальным приемлемым сопротивлением для качественной работы тягодутьевых устройств по трактам. Параметры сопротивления аппарата, расхода уходящих газов и эффективности аппарата в инерционных аппаратах сильно взаимосвязаны. Все ученые по-разному подходят к решению данной проблемы при разработке проточной части своих аппаратов. В большинстве своем помогает проведение предварительного гидравлического расчета, который позволяет оценить все линейные и местные сопротивления. В ИВЗ крайне сложно произвести расчет по причине отсутствия точных коэффициентов сопротивлений, так как многие из них не табулированы и экспериментально не выведены. Ориентируясь на данные [4,5], было из натурального эксперимента получено полное сопротивление устройства, которое суммируется из всех сопротивлений по проточной части аппарата. Решение данной проблемы позволило бы снижать сопротивление и в других гидравлических, теплообменных аппаратах подобным способом. И задумываться об этом можно было бы на этапе предварительного конструктивного расчета.

Ранее проведенные исследования [4, 5] по данному аппарату показали, что невозможно снизить сопротивление аппарата только за счет конусности угла на проточной части ИВЗ, приходится также перфорировать поверхность раскателя, данный способ позволяет снизить сопротивление устройства на 3000 Па, если при этом будет сделано 24 отверстия. Изменения конфузальной зоны позволили уменьшить сопротивление на 10000 Па. И тем не менее, вопрос его снижения остается актуальным,

так как проектное значение – 660 Па, при этом на реально действующей установке тем временем сопротивление в ~13000 Па.

Данная работа является продолжением исследования [4, 5] и рассматривает вопрос снижения сопротивления установки за счет изменения диаметра входного патрубка [13, 15]. Особенность исследования в том, чтобы получить чистую убыль перепада давления на аппарате исследуется изначальная конструкция без дополнительных изменений (перфорированных отверстий, дополнительные особенности конфузорного участка). При данных изменениях геометрия выходного патрубка никоим образом не модифицировалась, чтобы не вносить незапланированных изменений.

На сегодняшний день разница теоретических и практических результатов сведена к минимуму. Математическая модель расчета с помощью МКР апробирована с точки зрения граничных условий и подбираемой под расчет сетки и последующие результаты можно смело применять при разработке и внедрении конструкции золоулавливающего устройства в промышленность.

Литературный обзор

В [6] вопрос снижения аэродинамического сопротивления решается тем, что изначально конструкция золоуловителя не представляет собой сложную проточную часть, принцип улавливания – преимущественно гравитационный. Частицы диаметром свыше 5-10 мкм улавливаются со степенью очистки 100%, ниже – 50%. Также сопротивление увеличивается при изменении концентрации частиц в потоке в большую сторону. А также часть сопротивления аппарата устраняет включенный в систему наддув, который позволяет увлекать за собой часть потока. В [11] теми же авторами экспериментально приводится для уменьшения сопротивления – тангенциальный раскручиватель потока (снижение сопротивления на 15%), так как энергию закрутки можно перевести в энергию осевого движения, а если встречные закрученные потоки, то сопротивление и вовсе снижается на 17,2-23,6%. В [12] подобный факт подтвержден другими учеными.

В публикациях [2,7,8] авторами рассматривается усовершенствованная установка циклона-фильтра и сопротивление пористых фильтров. В [2] крайне сложно, хотя бы по причине того, что фильтр сложно поддается физическому моделированию. Аппарат может уловить частицы диаметром 0,5-20 мкм. Процесс удержания пыли на волокнах зависит от межмолекулярного взаимодействия их поверхностных элементов – ситовый эффект, отсев, касание. Расчеты осаждения имеют особое значение для проектирования и эксплуатации систем очистки производственных выбросов с радионуклидными, бактериологически активными и подобными загрязнителями. В [7] изначально планировалось разработка аппарата с низким гидравлическим сопротивлением для улавливания тонкой фракции частиц (двойное осаждение включает в себя фильтр из ткани Пермякова, фильтрующая вставка, стенки циклона).

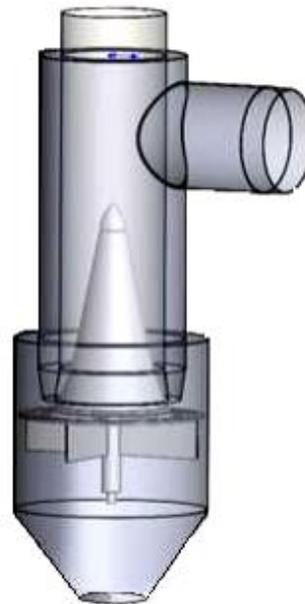
В [1,14] предложена установка концентрических направляющих, радиальные размеры которых на входе в короткий диффузор определяются с учетом профиля поля скоростей в воздуховоде перед диффузором. В результате в выходном сечении диффузора отсутствуют ярко выраженные локальные скорости газового потока, а также уменьшаются вихреобразования. Анализ результатов численных исследований показал, что установка концентрических направляющих в проточной части короткого диффузора позволяет уменьшить неравномерность профиля поля скоростей на выходе из него и снизить аэродинамическое сопротивление фильтра в целом по сравнению с вариантом диффузора без направляющих.

На рисунке 1 а) приведено изображение расположения ИВЗ на ТЭЦ-4 города Омска. На рисунке 1 б) схема испытуемой установки, а на в) изображен ход движения потока уходящих газов. На рисунке 1 г) же показано максимально увеличенное изображение диаметра входного патрубка со сдвигом внешней части корпуса.

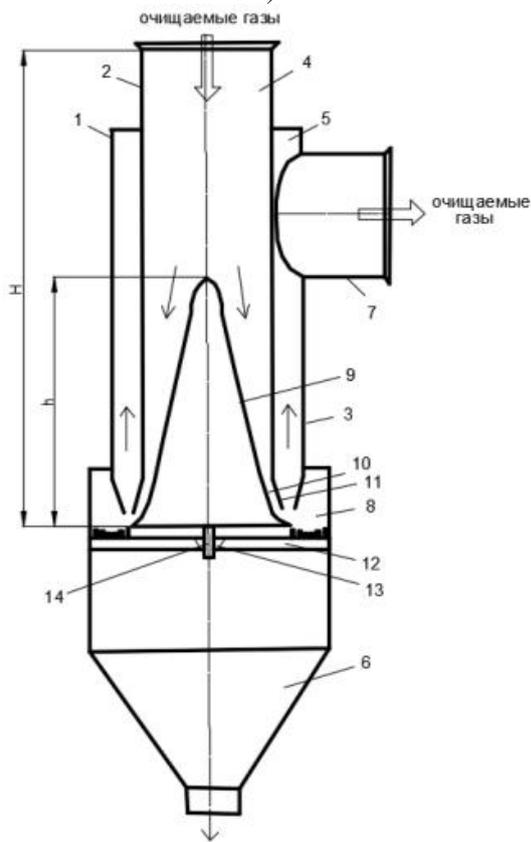
Трудности, возникающие в разработке темы связаны с тем, что каждый ученый рассматривает вопрос снижения сопротивления с точки зрения своего разрабатываемого оборудования. Сложно вырвать из контекста смысл применения определенной модификации к своей аэродинамической конструкции. Несмотря на то, что вычислительные средств почти у всех ученых одинаковые.



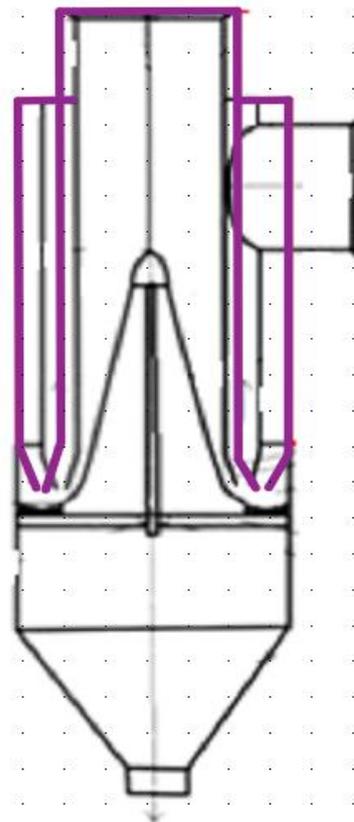
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Инерционно-вакуумный золоуловитель. 1 – корпус, 2, 3 – цилиндрические обечайки, 4 – входной патрубок, 5 – канал для очищенных дымовых газов, 6 – золоприемная камера (ЗПК), 7 – выходной патрубок, 8 – поворотная камера ПК, 9 – рассекатель, 10 – конфузурное выходное сопло, 11 – входной диффузорный участок, 12 – кольца, 13 – удерживающая кольца крестовина, 14 – ось.

Fig. 1. Inertial-vacuum ash catcher. 1 - housing, 2, 3 - cylindrical shells, 4 - inlet pipe, 5 - channel for purified flue gases, 6 - ash receiving chamber (ARC), 7 - outlet pipe, 8 - PK rotary chamber, 9 - divider, 10 - confuser outlet nozzle, 11 - inlet diffuser section, 12 - rings, 13 - ring retaining cross, 14 - axis.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Материалы и методы

Для численных расчетов использовался CFD-модуль на основе метода конечных разностей (ANSYS CFX). Для сведения к минимуму погрешности вычисления сетка формировалась с выдерживанием таких критериев как:

- orthogonality angle (ортогональность),
- expansion factor (коэффициент расширения),
- aspect ratio (отношение площадей соседних ячеек).

Важно при моделировании зайти в приемлемые диапазоны по данным значениям: orthogonality angle > 20°, expansion factor < 20, aspect ratio < 100, тогда сетка и проведенный эксперимент считаются выполненными с минимальными показателями погрешности.

Математическая модель гомогенного потока приведена ниже.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0.$$

Уравнения движения:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M.$$

Уравнения k - ε модели:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb};$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{kb}).$$

Уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Смещение частицы рассчитывается с использованием прямого интегрирования Эйлера скорости частицы по временному шагу, δt . Таким образом, $(dx_p/dt) = U_p$, перемещение частицы записывается как

$$x_p^n = x_p^0 + U_p^0 \delta t.$$

Расчет массы частиц на входе и на выходе оценивается как $m = \rho_d \frac{\pi d^2}{6}$, где ρ_d – плотность частицы, а d – ее диаметр. Аналитическое решение уравнения импульса частицы:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_p + F_{BA},$$

где m_p – масса частицы, а F_{ali} принимается как сумма всех сил, влияющих на частицу, F_D – сила аэродинамического сопротивления; F_B – сила тяжести; F_R – сила, обусловленная вращательным движением; F_{VM} – сила, обусловленная ускорением частицы относительно газа; F_p – сила, обусловленная градиентом давления; F_{BA} – сила Бассе.

Основная сила, оказывающая влияние на улавливание частиц пыли в ИВЗ второго поколения, это аэродинамическая сила.

Аэродинамическая сила сопротивления частицы пропорциональна скорости скольжения U_S между частицей и скоростью жидкости:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_S| U_S = \frac{1}{2} \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \rho_p A_p |U_F - U_p| (U_F - U_p),$$

C_D – поправочный коэффициент сопротивления; ρ_F – плотность газовой составляющей потока, кг/м³; A_F – площадь, занимаемая частицей, м²; U_S – скорость скольжения, разность скорости потока U_F по отношению к скорости частицы U_p , м/с; Re – число Рейнольдса; ρ_p – плотность частицы, кг/м³.

Аэродинамическая сила F_D пропорциональна значению числа Рейнольдса. Значение

силы тяжести F_B не учитывается, т. к. поток частиц мелкодисперсен. Скорость оседания частиц из-за силы тяжести $< 0,1$ м/с. Сила Кориолиса, возникающая при вращении частицы F_R , оказывает значительное влияние только при создании крупномасштабных вихрей. Сила градиента давления F_p , виртуальная массовая сила F_{VM} , сила Бассэ F_{BA} не учитываются по причине незначительности из-за отсутствия двухфазности газового потока.

Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли, является степень очистки (эффективность обеспыливания), %:

$$\eta = \frac{m_{ул}}{m_{вх}} \cdot 100.$$

$m_{ул}$ – массовый расход уловленных частиц, кг/с, $m_{вх}$ – массовый расход частиц на входе в установку, кг/с.

К-ε модель взята в расчет, так как является самой распространенной в вычислительной гидродинамике, и результаты расчетов с ней апробированы в ходе натурного эксперимента на аппарате ИВЗ промышленной версии. Также подобная модель может быть применима для потоков, в которых важно учет зон рециркуляции и подключение y^+ и производить учет влияния пристеночного слоя на аэродинамические характеристики потока. В следствие изучения и обобщения были получены следующие результаты. Отклонение результатов от данных, полученных в промышленном эксперименте до 5%, это связано с ошибками вычислительного аппарата при проработке мелкосеточной модели.

В процессе математического моделирования аппарата были созданы средствами САД различные вариации установки с шагом увеличения диаметра на 40 мм. Далее при граничных условиях: скорость на входе (менялась в зависимости от диаметра установки 14-23 м/с при сохранении расходной характеристики потока), гранулометрический состав частиц 1-40 мкм, разрежение между входом и выходом установки, теплофизические свойства потока (вязкость потока, плотность газовой составляющей, плотность частиц). Расходная характеристика потока не менялась. Взаимосвязь потока с частицами отражалась функцией – One-way coupling (поток слабозапыленный, т.к. концентрация частиц 70 г/м^3).

Результаты

В ходе проведения численных экспериментов были получены результаты расчета, сведенные в таблицу 1. Особенность данного исследования в том, что подобный способ моделирования связан с естественным снижением давления за счет расширения входного сечения.

Таблица 1

Общие данные полученные в ходе численных экспериментов
General data obtained in the course of numerical experiments

Диаметр входного патрубка d , мм	1500	1540	1580	1620	1660	1700	1740	1780	1840	1900	1960	2020	2080
Перепад давления на аппарате, dp , мм. вод. ст.	1273	863,9	570,1	495,7	490	468,9	430,2	395,8	315,6	279,8	307,8	285,9	289
Перепад давления на аппарате, dp , Па	12730	8639	5701	4957	4900	4689	4302	3958	3156	2798	3078	2859	2890
Значение максимальной скорости w_{max} , м/с	125	105	83	82,6	87,5	78	70,8	78,7	75	75	59,95	57	58
Степень эффективности очистки η , %	77,63	94,58	83,1	86,7	81,34	92,88	95,78	95,44	97,63	94,37	77	49,2	63
Максимальная скорость (развивается до/после поворота)	до	до	до	после									

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Увеличение диаметра патрубка привело к уменьшению перепада давления на 9932 Па. Максимальная скорость развивается исключительно после разворота потока в сторону выходной части корпуса. Приемлемая степень эффективности была достигнута при 1840 мм входного диаметра, где значение перепада давлений на установке составило 315,6 Па, что на 9574 Па меньше сопротивления при изначальном диаметре.

Обсуждение

Исходя из цветовых градаций по анализу рисунка 2 скорости доходят до 125 м/с

при этом перепад давлений 12730 Па. Максимальная скорость развивается вдоль рассекателя по входному патрубку вблизи к месту до поворота потока газов. На верхней части рассекателя образуется зона нулевых скоростей потока, связано это с изначально большими скоростями на входе, поток столкнулся с торцевой частью и затормозился, это также могло вызвать дополнительное сопротивление на участке. Интересная особенность – появление зоны с тем же давлением после выхода из входного патрубка. Это может быть связано с тем, что в бункере поддерживается статическое давление, которое может вытеснять поток из зоны бункера. Тем временем пылевого потока это не касается. Набранной на рассекателе кинетической энергии хватает на преодоление этого барьера.

Винтовой канал и раскручивающее устройство [3] в проточной части ИВЗ выполнять неудобно. Целесообразно его располагать на выходе, но любое дополнительное вмешательство по изменению геометрии приведет к добавленному сопротивлению в полное давление на аппарате [5].

На рисунке 2 представлено распределение скоростей и давлений по проточной части установки при конструктивных данных по запатентованной установке.

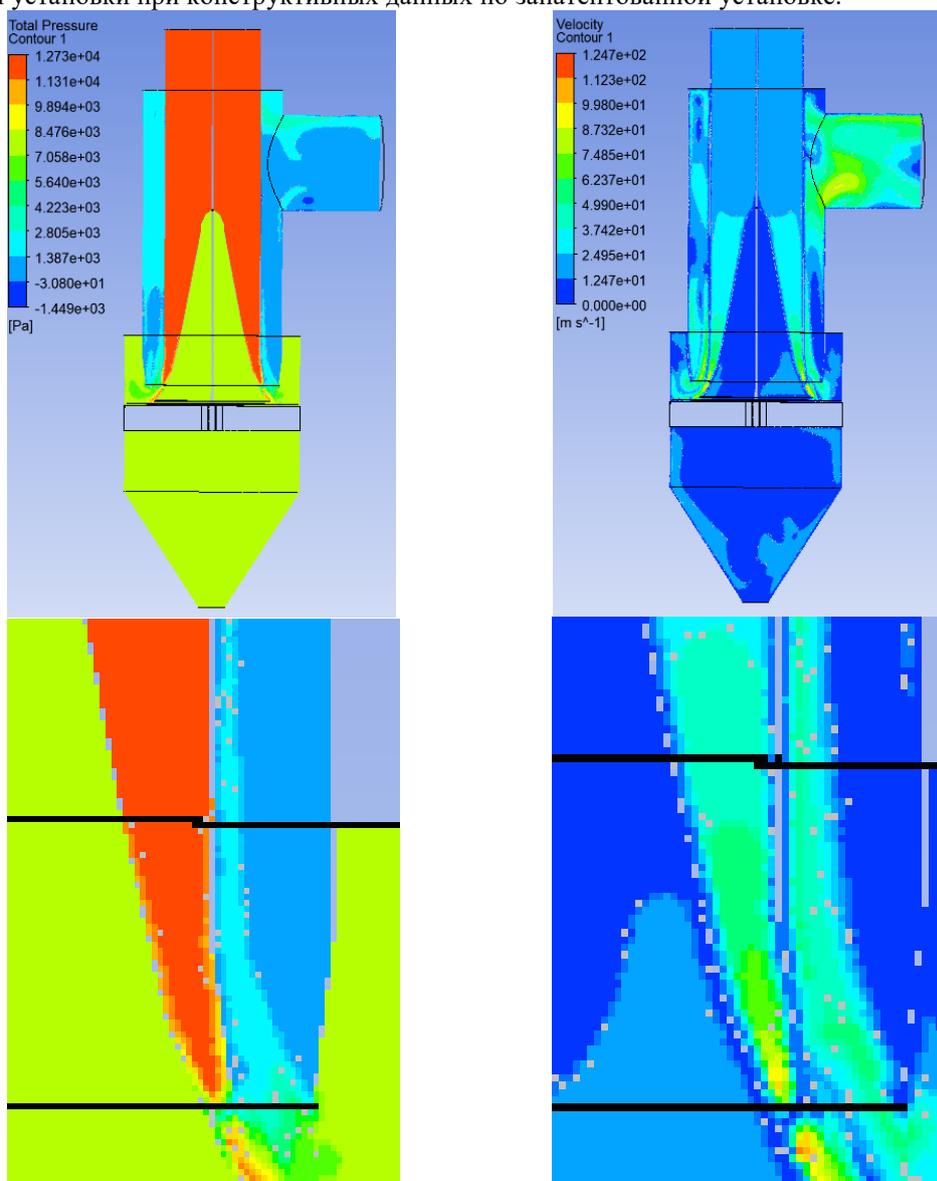


Рис. 2. Начальные параметры установки по изменению скорости и давления в проточной части установки

Fig. 2. Initial parameters of the installation for changing the speed and pressure in the flow path of the installation

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 3 вариант с самым большим диаметром входного патрубка. Геометрия рассекателя при всех опытах оставалась неизменной.

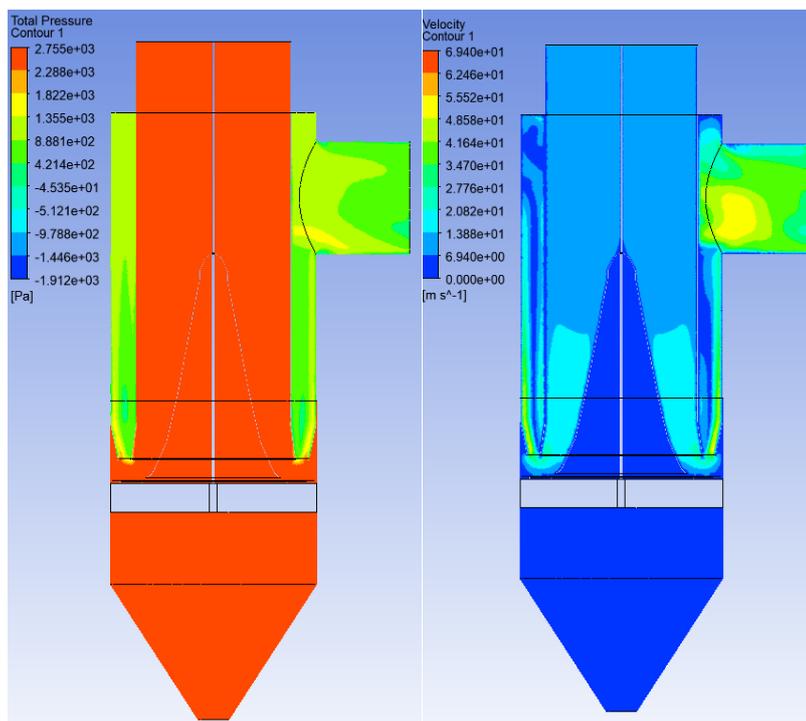


Рис. 3. Максимальный входной диаметр (2080 мм) по расчетам с плоскостью с разверкой давления и скорости по сечению

Fig. 3. Maximum inlet diameter according to calculations with a plane with a pressure and velocity scan over the section

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На рисунке 4 и 5 приведены исследуемые зависимости. Есть оптимальные значения диаметров, при которых достигается максимальная эффективность улавливания. При диаметрах 1700-1900 мм эффективность улавливания свыше 92%, сопротивление аппарата при этом падает на 8000-10000 Па от изначального.

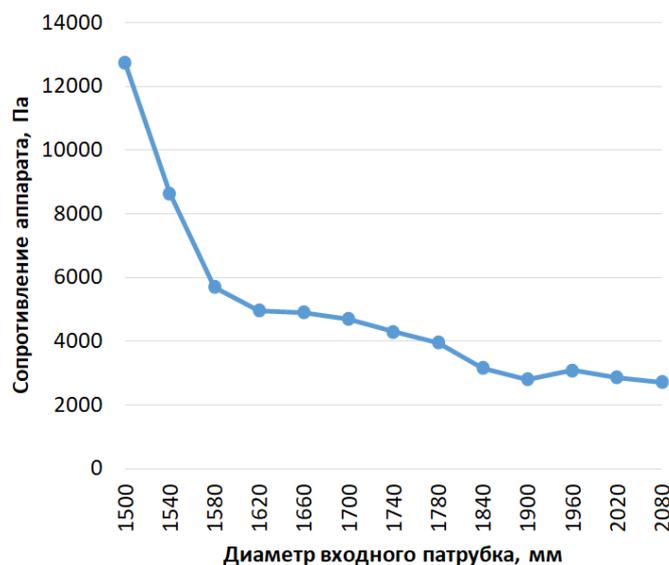


Рис. 4. Зависимость изменения перепада давления на аппарате от увеличения диаметра входного патрубка

Fig. 4. Dependence of the change in the pressure drop on the apparatus on the increase in the diameter of the inlet pipe

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Из рисунка 5 видно, что при снижении сопротивления аппарата до 184-307,8 мм.вод.ст. наблюдается снижение эффективности аппарата, что связано с соответствующими им большим диаметрам (1970-2080 мм), в конфузормом участке не достигается необходимой для разделения потока скорости (60 м/с и более). Качественное сепарирование частиц от газового потока ранее было зафиксировано именно при таких скоростях.

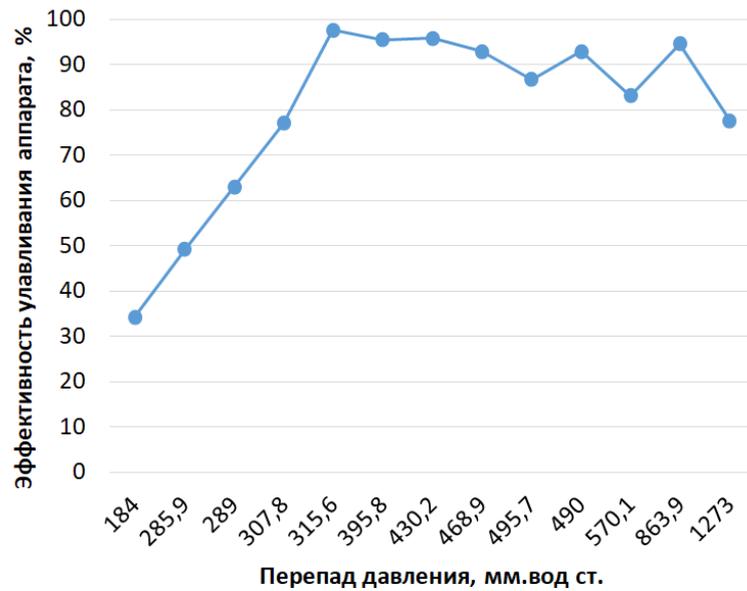


Рис. 5. Зависимость изменения эффективности на аппарате от изменения перепада давления

Fig. 5. Dependence of efficiency on the change in pressure drop across the apparatus

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Рисунок 6 иллюстрирует сложности, возникающие при очистке потока при максимальном диаметре. Степень улавливания – 50%. Это связано с:

- 1) Уменьшением скорости в конфузурном проходном сечении;
- 2) Уносом золы из бункера.

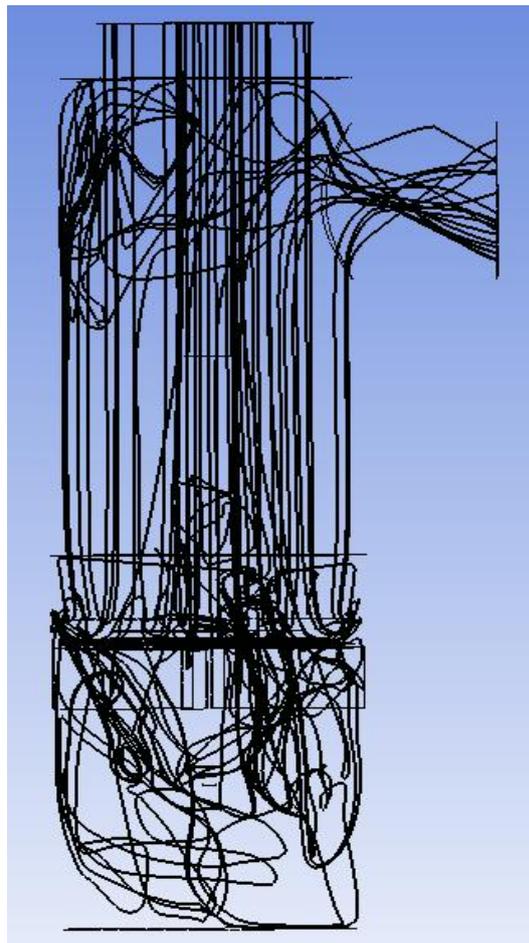


Рис. 6. Распределение концентрации запыленности потока по мере интенсивности улавливания золы.

Fig. 6. Distribution of the dust concentration of the flux as the ash is captured

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Заключение

Исходя из полученных данных можно отметить, что результаты расчетов, связанные с увеличенными размерами входных сечений, позволяют провести дополнительные исследования. Эти исследования будут связаны с уже полученными результатами расчетов, проведенными ранее для различных внутренних изменений аппарата, что позволяет надеяться на получение достаточно надежных расчетных данных при увеличенных входных размерах и эффективном золоулавливании.

Литература

1. Yusha V. L., Fil'kin N. Yu. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 52, Issue 7. P. 484–487.
2. Дмитриев, А. Н. Взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частицей / А. Н. Дмитриев, М. Г. Зиганшин // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2008. – № 3-4. – С. 58-63.
3. Злочевский, В. Л. Аэродинамическое сопротивление винтового канала в циклоне-сепараторе / В. Л. Злочевский, К. А. Мухопад // *Техника и технология пищевых производств*. – 2017. – № 3(46). – С. 102-107.
4. Мостовенко, Л. В. Модернизация инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Мостовенко, В. П. Белоглазов // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 120-125.
5. Мостовенко ЛВ. Флуктуации запыленного потока и их влияние на сопротивление золоулавливающего аппарата / ЛВ. Мостовенко, ВП. Белоглазов // *Актуальные вопросы энергетики*. 2022. Т. 4. № 1. С. 11-19. doi 10.25206/2686-6935-2022-4-1-11-19.
6. Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF) / N. M. Sergina, A. A. Sakharova, V. N. Azarov [et al.] // *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development", CATPID 2019, Kislovodsk, 01–05 октября 2019 года*. – Kislovodsk: EDP Sciences, 2019. – P. 01037. – DOI 10.1051/e3sconf/201913801037.
7. Замалиева, А. Т. Усовершенствованная установка фильтрации газа для подготовки топлива энергетических систем / А. Т. Замалиева, М. Г. Зиганшин // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2019. – Т. 21. – № 5. – С. 124-131. – DOI 10.30724/1998-9903-2019-21-5-124-131.
8. Belyaeva, G. I. Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices / G. I. Belyaeva, A. T. Zamalieva, M. G. Ziganshin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 5, 19 Mira Street, Ekaterinburg, 21–22 мая 2019 года. – 19 Mira Street, Ekaterinburg, 2020. – P. 012067. – DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012067.
9. Fassani, F. L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency / F. L. Fassani, L. Goldstein // *Powder Technology*. – 2000. – Vol. 107. – No 1-2. – P. 60-65. – DOI 10.1016/S0032-5910(99)00091-1.
10. L. Sun, Z. Ye, R. Cui, X. Huang, and C. Wu, “Eliminating isomorphism identification method for synthesizing nonfractionated kinematic chains based on graph similarity,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 167, p. 104500, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104500.
11. К вопросу о снижении энергозатрат в системах обеспыливания выбросов в атмосферный воздух / Н. М. Сергина, А. В. Курасов, В. М. Зотов, М. С. Соломахин // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2022. – № 3(88). – С. 165-171.
12. Чичиров, К. О. Экспериментальные исследования характеристик первичного ввода пылеуловителя на встречных закрученных потоках / К. О. Чичиров, М. К. Бочаров, Т. Т. Фахриев // *Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сборник статей XXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 28–29 апреля 2020 года / Под редакцией Т.И. Королевой*. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2020. – С. 183-188.
13. Луканин, Д. В. Основные параметры, влияющие на пылеулавливание и структуру потоков в аппаратах ВЗП / Д. В. Луканин, В. И. Милохова // *Теоретический и практический потенциал современной науки : Сборник научных статей / Научный редактор Д.В. Фурсова*. – Москва : Издательство "Перо", 2019. – С. 87-89.

14. Филькин, Н. Ю. Повышение газодинамической эффективности фильтров с коротким диффузором при работе в завихренном потоке / Н. Ю. Филькин, В. Л. Юша, А. А. Капелюховская // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 72-79. – DOI 10.25206/2588-0373-2018-2-1-72-79.

15. Wood, R. M. Aerodynamic drag and drag reduction: Energy and energy savings / R. M. Wood // 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 06–09 января 2003 года. – Reno, NV: Без издательства, 2003.

Авторы публикации

Мостовенко Любовь Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики, Нижневартковский государственный университет.

Белоглазов Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики, Нижневартковский государственный университет.

References

1. Yusha VL, Fil'kin NYu. Numerical analysis of gas dynamic efficiency of short diffusers with internal guiding blades. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;52(7):484–487.

2. Dmitriev AN, Ziganshin MG. Vzaimodeistviya pri kasanii prepyatstviya vzveshennoi v potoke chastitsej. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2008;(3-4): 58-63.

3. Zlochevskii VL, Mukhopad KA. Aerodinamicheskoe soprotivlenie vintovogo kanala v tsyklone-separatore. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2017;3(46):102-107.

4. Mostovenko LV, Beloglazov VP. Modernizatsiya inertsionno-vakuumnogo zoloulovitelya. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2022;15(2):120-125.

5. Mostovenko LV, Beloglazov VP. Fluktuatsii zapylennogo potoka i ikh vliyanie na soprotivlenie zoloulavlivayushchego apparata. *Aktual'nye voprosy energetiki*. 2022. 4(1): 11-19.

6. Sergina NM, Sakharova AA, Azarov VN. *Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental-engineering systems of smallsize devices with counter-swirling flows (CSF)*. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development», CATPID 2019. 2019: 01037.

7. Zamalieva AT, Ziganshin MG. Usovershenstvovannaya ustanovka fil'tratsii gaza dlya podgotovki topliva energeticheskikh system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019;21(5):124-131.

8. Belyaeva GI, Zamalieva AT, Ziganshin MG. *Experimental and calculated testing of the efficiency of cyclone filtering devices*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;012067.

9. Fassani FL, Goldstein L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection. *Powder Technology*. 2000; 107(1-2): 60-65.

10. Sun L, Ye Z, Cui R, et al. Eliminating isomorphism identification method for synthesizing nonfractionated kinematic chains based on graph similarity. *Mechanism and Machine Theory*. 2021; (167): 104500.

11. Sergina NM, Kurasov AV, Zotov VM, et al. K voprosu o snizhenii energozatrat v sistemakh obespylivaniya vybrosov v atmosferyni vozdukh. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2022. 3(88): 165-171.

12. Chichirov KO, Bocharov MK, Fakhriev TT. *Eksperimental'nye issledovaniya kharakteristik pervichnogo vvoda pyleulovitelya na vstrechnykh zakruchennykh potokakh. Problemy energosberezheniya v promyshlennom i zhilishchno-kommunal'nom kompleksakh : sbornik statei XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Penza, 28–29 aprelya 2020 goda. 2020: 183-188.

13. Lukanin DV, Milokhova VI. Osnovnye parametry, vliyayushchie na pyleulavlivanie i strukturu potokov v apparatakh VZP. *Teoreticheskii i prakticheskii potentsial sovremennoi nauki : Sbornik nauchnykh statei*. 2019:87-89.

14. Fil'kin NYu, Yusha VL, Kapelyukhovskaya AA. Povyshenie gazodinamicheskoi effektivnosti fil'trov s korotkim diffuzorom pri rabote v zavikhrennom potoke. *Omskii nauchnyi*

vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie. 2018. 2 (1): 72-79.

15. Wood RM. Aerodynamic drag and drag reduction: *Energy and energy savings*. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno. 2003.

Authors of the publication

Lyubov V. Mostovenko – Nizhnevartov State University, Nizhnevartovsk, Russia.

Vladimir P. Beloglazov – Nizhnevartov State University Nizhnevartovsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4. Энергетика и электротехника

Смежные шифры в рамках группы научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 15.12.2022 г.

Отредактировано 03.05.2023 г.

Принято 15.06.2023 г.



СРАВНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИВИХРЕВОГО СЕПАРАТОРА С ЦИКЛОНАМИ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Зинуров В.Э.¹, Дмитриев А.В.², Биккулов Р.Я.³, Дмитриева О.С.⁴, Абдуллина А.А.⁵

^{1,2,5}Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

^{3,4}Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4783-147X>, bikkulov-ry@mail.ru³

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6221-0167>, ja_deva@mail.ru⁴

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4047-4919>, azalkaabdullina69826@gmail.com⁵

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Циклонные сепараторы применяют для отделения твердых частиц пыли из воздуха, поступающего в турбину. Ключевыми факторами при их выборе являются перепад давления и эффективность. Исследования, направленные на улучшение данных показателей при сохранении остальных достоинств циклонов, а также разработка новых устройств пылегазоочистки, не уступающих им, являются актуальными. **ЦЕЛЬ.** Сравнение технических характеристик мультिवихревого сепаратора с циклонами различных модификаций по эффективности сепарации частиц из запыленной среды, критерию Фруда и критерию Эйлера. **МЕТОДЫ.** Исследования проводятся с использованием современных методов регистрации параметров на лабораторном стенде. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Фракционная эффективность сепарации твердых частиц размером от 1 до 80 мкм из газового потока у мультिवихревого сепаратора выше, чем у циклонных сепараторов: СК-ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24. Анализ эффективности по критерию Фруда Fr аналогично показал, что мультивихревой сепаратор предпочтительнее циклонов УЦ-38-250, УЦ-38-500, УЦ-38-750, УЦ-38-850, СЦН-40 и ЦН-11-400. Установлено, что с увеличением Fr к.п.д. возрастает. По критерию Эйлера Ei можно установить, что использование мультивихревого сепаратора осуществляется с меньшими энергетическими затратами относительно циклонов модификаций УЦ с диаметром корпуса 500 мм и более, СЦН-40 и ЦН-11-400. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные исследования показывают, что применение мультивихревого сепаратора может быть рассмотрено в качестве замены циклонных сепараторов для очистки циклового воздуха газотурбинных установок. Достоинства – простота конструкции, отсутствие трения вихрей о стенки сепаратора, малое значение критерия Эйлера, эффективность близкая к 100% при улавливании частиц диаметром более 6 мкм.

Ключевые слова: комплексное воздухоочистительное устройство; мультивихревой сепаратор; циклон; критерий Эйлера; критерий Фруда; эффективность; улавливание частиц.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-3577.2022.1.

Для цитирования: Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Абдуллина А.А. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. №. С.117-127. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-117-127.

COMPARISON OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A MULTI-VORTEX SEPARATOR WITH CYCLONES OF VARIOUS MODIFICATIONS

VE. Zinurov¹, AV. Dmitriev², RY. Bikkulov³, OS. Dmitrieva⁴, AA. Abdullina⁵
^{1,2,5}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

^{3,4}Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4783-147X>, bikkulov-ry@mail.ru³

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6221-0167>, ja_deva@mail.ru⁴

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4047-4919>, azalkaabdullina69826@gmail.com⁵

Abstract: *RELEVANCE.* Cyclone separators are used to separate solid dust particles from the air entering the turbine. The key factors in their selection are pressure drop and efficiency. Research aimed at improving these indicators while preserving the other advantages of cyclones, as well as the development of new dust and gas cleaning devices that are not inferior to them, are relevant. *THE PURPOSE.* Comparison of the technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications on the efficiency of separation of particles from a dusty medium, the Froude criterion and the Euler criterion. *METHODS.* It carried the research out using modern methods of recording parameters on a laboratory stand. *RESULTS.* The fractional efficiency of separation of solid particles with a size from 1 to 80 microns from the gas stream of a multi-vortex separator is higher than cyclone separators: SK-CN-24, CN-11, CN-15, CN-24. An analysis of the efficiency according to the Froude Fr criterion similarly showed that a multi-vortex separator is preferable to cyclones UC-38-250, UC-38-500, UC-38-750, UC-38-850, SCN-40 and CN-11-400. We establish that with an increase in Fr, the efficiency increases. According to the Euler Eu criterion, it can be established that the use of a multi-vortex separator is carried out with lower energy costs relative to cyclones of the UC modifications with a body diameter of 500 mm or more, SCN-40 and CN-11-400. *CONCLUSION.* The conducted studies show that the use of a multi-vortex separator can be considered as a replacement for cyclone separators for cleaning the cyclic air of gas turbine installations. Advantages – simplicity of design, absence of friction of vortices on the walls of the separator, low value of the Euler criterion, efficiency close to 100% when capturing particles with a diameter of over 6 μm .

Keywords: complex air preparation device; multi-vortex separator; cyclone; Euler's criterion; Froude's criterion; efficiency; particle capture.

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduate's SP-3577.2022.1.

For citation: Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Bikkulov R.Ya., Dmitrieva O.S., Abdullina A.A. Comparison of technical characteristics of a multi-vortex separator with cyclones of various modifications. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):117-127. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-117-127.

Введение (Introduction)

Топливо-энергетический комплекс составляет основу энергетики Российской Федерации. Потребление и производство электроэнергии по данным АО «СО ЕЭС» в России растет, поэтому для удовлетворения растущего спроса одной из ключевых задач производственных предприятий, относящихся к энергетике, является повышение энергоэффективности работы систем. Современные турбомашины требуют высокой удельной выходной мощности и повышенной энергоэффективности при производстве электроэнергии, низких капиталовложений, затрат на техническое обслуживание и эксплуатацию, низких выбросов загрязняющих веществ [1]. Газовые турбины во время работы используют в качестве рабочего тела атмосферный воздух, учитывая, что значительная их часть работает в сложных климатических условиях (высокая температура и запыленность воздуха) с интенсивным промышленным использованием, то существенным фактором производительности, генерируемой электрической мощности и срока службы газовой турбины является качество воздуха, поступающего в него [2]. Правильный выбор комплексного воздухоочистительного устройства позволит эффективно влиять на работу газовой турбины, предотвращая загрязнения, коррозию и эрозию [3], что существенно снизит затраты на плановые и аварийные остановы [4, 5]. Следует учитывать размер частиц загрязняющих веществ, присутствующих в воздухе, их количество, эффективность очистки, потери давления в системе фильтрации и др. [6].

Литературный обзор (Literature Review)

Комплексное воздухоочистительное устройство состоит из нескольких ступеней, в котором, как правило, на ступени грубой очистки используются циклонные сепараторы или плоские панели с фильтрующими элементами накопительного типа [7, 8]. В настоящее время применение циклонов морально устарело при всех их имеющихся достоинствах (простота конструкции и ее оптимизация, отсутствие движущихся частей, ремонтпригодность, стабильность работы в широком диапазоне температур и агрессивных средах), на смену им приходят более компактные и менее металлоемкие фильтры с разными классами фильтрации G2-G4. На ступени основной фильтрации применяются фильтры с классами фильтрации от F8 до E11/H12. Общее количество фильтров на каждой ступени в зависимости от производительности составляет от 100 до 600 штук.

Эффективность фильтрующих элементов была предметом многочисленных исследований [4, 9, 10], при этом прогнозирование их срока службы, обусловленного перепадом давления во время засорения, все еще актуальна, особенно, в случае улавливания мелкодисперсных частиц. Кроме этого, стоит понимать, что стоимость фильтров тонкой очистки велика и необходимо принимать меры по снижению эксплуатационных издержек [11, 12]. Анализ конструкций и опыт эксплуатации фильтрующих устройств воздухозаборных трактов газотурбинных установок [2] показал неудовлетворительные аэродинамические характеристики и низкую эффективность. Также следует отметить, что использование инерционных аппаратов (циклонов) в зонах с повышенным содержанием пыли является более надежным, чем применение дорогостоящих сменных фильтров накопительного типа, что требует вынужденных остановов и определенной финансовой устойчивости предприятия в части расходов на приобретение и содержание сменных фильтров. Таким образом, по-прежнему необходимо и сложно усовершенствовать существующие технологии очистки воздуха, поступающего в компрессор газотурбинной установки от твердых взвешенных частиц для повышения эффективности работы комплексной воздухоочистительной установки, что в свою очередь влияет на технико-экономические показатели газотурбинной установки. Теоретическая значимость заключается в получении зависимости для определения эффективности мультивихревого сепаратора и рекомендаций для ее использования, получения сравнительных характеристик критериев подобия циклонов различных модификаций и разработанного сепаратора. Практическая значимость исследования состоит в разработке конструкции мультивихревого сепаратора и возможности его использования для очистки воздуха на предварительной ступени, прогнозировании изменения перепада давлений и эффективности фильтрации, чтобы уменьшить нагрузку на основной фильтр тонкой очистки, продлить срок его службы и снизить стоимость замены.

Описание мультивихревого сепаратора. Цель исследования (Description of the multi vortex separator. The purpose of the study)

Авторами был разработан мультивихревой сепаратор, который предназначен для улавливания мелких, средних и крупных частиц из запыленного потока воздуха. Конструкция сепаратора защищена патентом РФ [13]. Одной из ключевых задач при разработке данного аппарата (рис. 1) являлось создание компактного устройства с возможностью его размещения в ограниченных пространствах при достижении высокой эффективности и низкого гидравлического сопротивления.

За счет оригинальной конструкции в сепарационной зоне при течении запыленной среды создаются центробежные силы высоких значений, существенно выше аналогичных сил, образующихся в классических центробежных аппаратах – циклонах, что позволяет эффективнее отделять мелкие частицы размером до 10 мкм из воздуха. При этом несомненным преимуществом является отсутствие движущихся элементов и простота конструкции, что обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление мультивихревого сепаратора. Сопротивление предлагаемого устройства на несколько порядков меньше, чем у фильтров тонкой очистки, даже при отсутствии в них уловленных частиц. [14]. Принцип работы сепарационного устройства. Воздух со взвешенными частицами входит в мультивихревой сепаратор (рис. 1) через квадратные ячейки 2, образующие сепарационные элементы. Задняя крышка не позволяет сразу выйти потоку воздуха из устройства, перенаправляя его к стенкам. В стенках каждого сепарационного элемента 2 с определенным шагом имеется группа больших 3 и малых 4 отверстий, через которые при своем движении поток воздуха с частицами попадает в зону сепарации 6. Необходимо отметить, что роль больших 3 и малых 4 отверстий различна. Большие отверстия 3 определяют формирование вихревой структуры в зоне 6, а малые отверстия 4 отвечают за поддержание структуры нестабильных вихрей в угловых зонах мультивихревого сепаратора. Таким образом, поток воздуха при прохождении через

большое отверстие 3 инерционно распределяется по двум сторонам влево и вправо, тем самым образуя два вихря. Конструктивно соседние большие отверстия расположены таким образом, чтобы при выходе из них воздуха создаваемые завихрения вращались в своей области подобно «шестеренкам», не пересекаясь с соседними, что привело бы к их разрушению. При этом в точках контакта соседних вихрей векторы скорости будут сонаправлены. Вихри ограничены стенками только с двух сторон: внутренней стенки корпуса сепаратора 1 и внешней стенки сепарационных элементов квадратной формы 2, в результате трения потока о стенки существенно уменьшается, следовательно, уменьшаются энергетические затраты при течении воздуха (гидравлическое сопротивление).

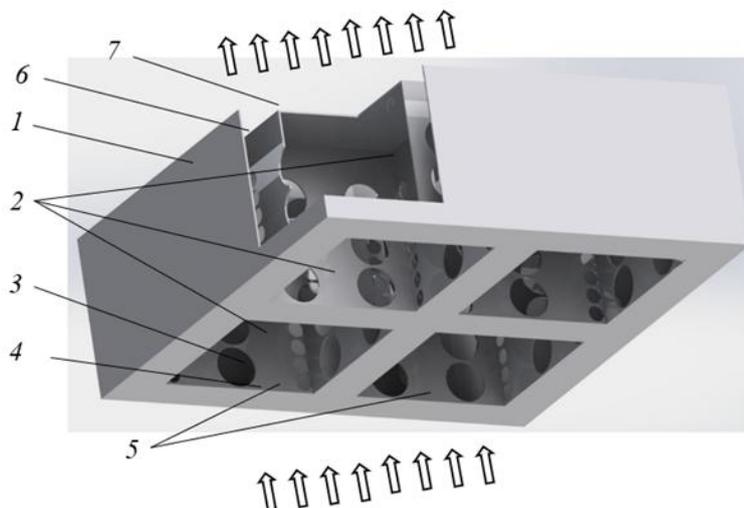


Рис. 1. Упрощенная трехмерная модель мультивихревого сепаратора: 1 – корпус; 2 – сепарационные элементы квадратной формы; 3 – большие отверстия; 4 – малые отверстия; 5 – вход в сепаратор; 6 – зона сепарации; 7 – выход из сепаратора

Fig. 1. Simplified three-dimensional model of a multi-vortex separator: 1 – housing; 2 – square-shaped separation elements; 3 – large holes; 4 – small holes; 5 – entrance to the separator; 6 – separation zone; 7 – exit from the separator

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Как видно из рисунка 1, диаметр больших круглых отверстий 3 мал относительно самого устройства и составляет менее 15–25 мм. Следовательно, диаметр образующихся вихрей вдвое меньше, а центробежные силы, возникающие при вращательном движении воздушной среды, имеют большие значения. Под их действием, частицы различной дисперсности перемещаются к внутренним стенкам корпуса сепаратора 1 и постепенно оседают. Завихренный очищенный воздух поднимается, покидает зону сепарации 6 и сам мультивихревой сепаратор. Необходимо отметить, что на рис. 1 представлена упрощенная модель устройства, не показано, что в нижней части зоны 6 имеется серия щелей, через которые частицы сыплются в пылесборный мешок. Стоит отметить наличие нестабильных завихрений в угловых зонах, т.е. вихревая структура может приобретать хаотичное движение, что приводит к уносу частиц из сепаратора. Для решения этой проблемы с целью стабилизации вихревой структуры были предусмотрены малые отверстия 4 (рис. 1). Необходимо отметить, что проблема может быть решена также изготовлением аппарата с корпусом цилиндрической формы. Разработанное устройство было апробировано в системе очистки и подогрева воздуха в окрасочно-сушильной камере компании ООО «Каматек». Испытания показали, что применение предлагаемого устройства в качестве предфильтра способно увеличить время работы фильтров тонкой очистки до их замены почти в 2 раза, а иногда и больше.

Проведем сравнение мультивихревого сепаратора с известными циклонами, в которых преобладающими силами, влияющими на процесс выбивания частиц из воздуха, являются центробежные, те же, что и в мультивихревом сепараторе.

Падение давления и эффективность разделения являются общими параметрами, используемыми для оценки производительности сепараторов. Целью исследования является сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций по следующим параметрам: эффективность сепарации частиц из запыленной среды E , критерий Фруда Fr и критерий Эйлера Eu .

Материал и методы исследования (Material and methods of research)

Эффективность мультивихревого сепаратора рассчитывалась по ранее полученной

формуле [14]:

$$E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z\rho_a W_{in}}{\mu_G}} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z\rho_a W_{in}}{\mu_G}} \right), \text{ при } a < a_{cr}, \quad (1)$$

где a – диаметр частицы, м; A – отношение входной скорости потока в сепарационном элементе квадратной формы к скорости потока в круглых отверстиях; b – ширина сепарационных элементов квадратной формы, м; z – высота зоны сепарации, м; ρ_a – плотность частиц, кг/м³; W_{in} – скорость воздуха на входе в мультивихревой сепаратор, м/с; μ_G – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; a_{cr} – критический диаметр частиц, м.

Необходимо отметить соблюдение условия $a < a_{cr}$ для формулы (1). Так как с увеличением размера частиц a эффективность устройства E повышается, то при достижении диаметра частиц и более определенного критического размера a_{cr} , считаем, что эффективность соответствует значению 0,99–1.

Расчетная формула для определения критического размера частиц a_{cr} :

$$a_{cr} = \frac{3}{4} Ab \sqrt{\frac{\mu_G}{z\rho_a W_{in}}}. \quad (2)$$

В качестве эффективности центробежного разделения неоднородных систем был выбран критерий Фруда Fr , который равен отношению центробежной силы и силы тяжести:

$$Fr = \frac{w^2}{gL}, \quad (3)$$

где w – скорость потока воздуха, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – характерный размер области, в которой рассматривается течение потока, м.

Считается, что с увеличением Fr к.п.д. циклона возрастает. Необходимо отметить, что при расчете числа Фруда для циклонов под скоростью w принималась скорость на входе в аппараты, под характерным размером L принимался радиус цилиндрической части $R = D/2$, где D – диаметр цилиндрической части циклона, м. Для мультивихревого сепаратора под скоростью w принималась скорость в круглых отверстиях. Стоит отметить, что теоретическим (по средствам уравнения сплошности среды) и экспериментальным путем было установлено, что скорость в круглых отверстиях и на входе в мультивихревой сепаратор отличаются в диапазоне $\pm 10\%$ для конструкции, изображенной на рис. 1. Под характерным размером L принимался радиус одного завихрения в зоне сепарации $6 R_v = D_{vb}/2$, где D_{vb} – диаметр большого отверстия в сепарационном элементе.

В качестве критерия гидравлического сопротивления рассчитывался критерий Эйлера Eu (коэффициент давления), характеризующий соотношение сил давления и сил инерции в подобных потоках:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}, \quad (4)$$

где Δp – потери давления в аппарате, Па; ρ – плотность текучей среды, кг/м³.

Падение давления является мерой мощности, необходимой для работы циклона, и его наименьшее значение желательно с точки зрения энергопотребления. Увеличение потерь давления в системе фильтрации приводит к снижению выходной мощности газовой турбины и увеличению тепловой мощности. Стоит отметить, что значение скорости потока w при расчете критерия Эйлера Eu по формуле (4) для различных аппаратов принималось также, как и в вышеперечисленных случаях при расчете критерия Фруда Fr по формуле (3).

В обширной литературе показано, что производительность циклонного сепаратора чрезвычайно чувствительна к геометрическим параметрам. Для исследования были рассмотрены циклонные сепараторы, следующих моделей: СК-ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-

24, УЦ-38-250, УЦ-38-500, УЦ-38-750, УЦ-38-850 и СЦН-40. Конструктивное исполнение циклонов представлено на рисунке 2.

Технические характеристики и некоторые расчетные параметры для их сравнения с данными по мультивихревому сепаратору были взяты из открытых источников: фракционная эффективность от размера частиц для СК-ЦН-24¹, ЦН-11², ЦН-15, ЦН-24 [15], значения критериев Фруда Fr и Эйлера Eu для циклонов УЦ-38-250³, УЦ-38-500, УЦ-38-750, УЦ-38-850 [16], расчетные параметры для определения Фруда Fr и Эйлера Eu для циклона СЦН-40⁴ [17] и циклона ЦН-11-400⁵ [18].

Расчет эффективности мультивихревого сепаратора E по формуле (1) осуществлялся при следующих значениях параметров: $A = 0,5$, $\rho_a = 2000 \text{ кг/м}^3$, $b = 80 \text{ мм}$, $\mu_G = 0,0000178 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $z = 50 \text{ мм}$. При данных значениях параметров критическое значение диаметра частицы a_{cr} равно 5,66 мкм.

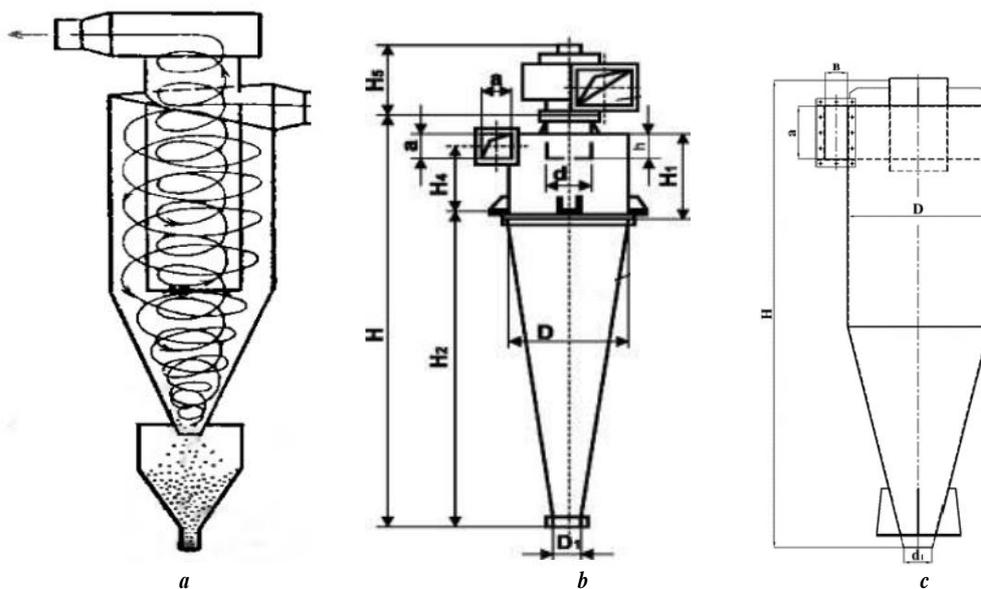


Рис. 2. Конструктивное оформление циклонов: *Fig. 2. Design of cyclones: a) CN – NIIOGAZ cyclone; b) UC – universal cyclone; c) SCN – NIIOGAZ spiral cyclone*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для определения потери давления в мультивихревом сепараторе Δp и скорости газа в круглых отверстиях был собран лабораторный стенд (рис. 3), основные элементы, которого были распечатаны на 3D принтере.

Стенд включает в себя воздуходувку 1 для подачи потока воздуха в установку, ресивер 2 с отверстиями, которые открывались или закрывались для изменения расхода потока, труба Вентури 3, позволяющая определить перепад давления в широкой и узкой частях данной трубы, и далее рассчитать скорость потока на входе в мультивихревой сепаратор 4. Перепад давления в трубе Вентури 3 и потери давления Δp в мультивихревом сепараторе 4 рассчитывались с помощью дифференциальных манометров testo 510i 5 и 6 соответственно. Погрешность данных измерительных устройств составляет $\pm 5 \text{ Па}$ при измерении давления в диапазоне от 0 до 100 Па и $\pm 2 \text{ Па} + 1,5\%$ от измеренного значения при измерении давления в диапазоне от 100 до 15000 Па. Стоит отметить, что труба Вентури создавалась согласно ГОСТ 8.586.4-2005 ГСИ⁶ (рис. 3).

¹24 – соотношение диаметров выхлопной трубы и цилиндрической части циклона

²11 – угол наклона входного патрубка относительно горизонтали, град.

³УЦ-38 – модель циклона ВНИИЗ (Мельstroy), 250 – диаметр корпуса, мм

⁴40 – отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру цилиндрической части (0,4)

⁵400 – внутренний диаметр цилиндрической части циклона, мм

⁶ГОСТ 8.586.4-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Трубы Вентури. Дата введения 2007-01-01. Москва: Стандартинформ.

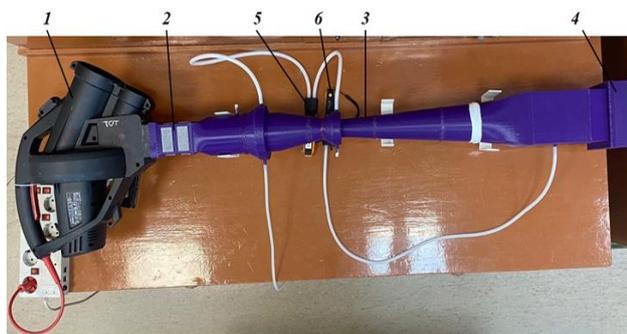


Рис. 3. Лабораторный стенд: 1 – воздуходувка; 2 – ресивер; 3 – труба Вентури; 4 – мультивихревой сепаратор; 5 – дифференциальный манометр для определения перепада давления в трубе Вентури; 6 – дифференциальный манометр для определения потери давления в мультивихревом сепараторе

Fig. 3. Laboratory stand: 1 – blower; 2 – receiver; 3 – Venturi pipe; 4 – multi-vortex separator; 5 – differential pressure gauge to determine the pressure drop in the Venturi pipe; 6 – differential pressure gauge to determine the pressure loss in the multi-vortex separator

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты исследования и их обсуждение (Research results and their discussion)

Результаты сравнительных данных мультивихревого сепаратора и циклонов различных модификаций представлены графически на рисунке 4 и сведены в таблицу 1.

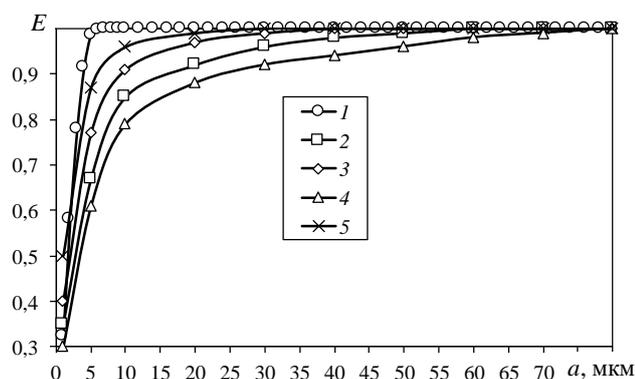


Рис. 4. Зависимость фракционной эффективности от размера частиц для аппаратов: 1 – мультивихревой сепаратор; 2 – ЦН-11; 3 – ЦН-15; 4 – ЦН-24; 5 – СК-ЦН-24

Fig. 4. Dependence of fractional efficiency on particle size for apparatuses: 1 – multi-vortex separator; 2 – CN-11; 3 – CN-15; 4 – CN-24; 5 – SK-SN-24

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В ходе исследований установлено, что фракционная эффективность сепарации твердых частиц размером от 1 до 80 мкм из воздушного потока у мультивихревого сепаратора выше, чем у циклонных сепараторов: СК-ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 (рис. 4). Анализ эффективности центробежного разделения частиц от воздуха по критерию Фруда F_r аналогично показал, что мультивихревой сепаратор предпочтительнее циклонов УЦ-38-250, УЦ-38-500, УЦ-38-750, УЦ-38-850, СЦН-40 и ЦН-11-400 (табл. 1).

По критерию Эйлера E_u можно установить, что использование мультивихревого сепаратора осуществляется с меньшими энергетическими затратами относительно циклонов модификаций УЦ с диаметром корпуса 500 мм и более, СЦН-40 и ЦН-11-400 (табл. 1). Более высокую фракционную эффективность мультивихревого сепаратора (рис. 4) относительно циклонов наглядным образом объясняют расчетные значения критерия Фруда F_r (табл. 1). Видно, что у мультивихревого сепаратора значения F_r в 5,1-42,6 раза выше аналогов. Стоит отметить, что такие высокие значения F_r мультивихревого сепаратора достигаются при более низких скоростях потока (6,38-12,76 м/с) относительно скоростей потока в циклонах (диапазоны скоростей начинаются от 9,96 м/с и заканчиваются 24 м/с). В свою очередь, анализ расчетной формулы (3) критерия Фруда F_r показывает, что для его роста необходимо увеличение скорости и/или уменьшение характерного размера. Очевидно, что увеличение скорости в большей степени влияет на увеличение F_r , нежели уменьшение L . Сопоставляя данные по скорости и радиусу аппаратов (таблица 1), подтверждается ранее высказанная теория

относительно оригинальности конструкции мультивихревого сепаратора, позволяющая создавать завихрения малого радиуса, тем самым при невысоких скоростях воздуха достигаются более высокие значения критерия Фруда Fr и, соответственно, фракционной эффективности E .

Таблица 1

Table 1

Сравнение критериев подобия циклонов различных модификаций и мультивихревого сепаратора
Comparison of similarity criteria of cyclones of various modifications and multi vortex separator

Модель аппарата	Определяющий размер (R), мм	Скорость (w), м/с	Критерий Фруда (Fr)	Критерий Эйлера (Eu)
УЦ-38-250	125	9–12	80–133	2,5
УЦ-38-500	250	10–12	41–64	5
УЦ-38-750	375	9–12	27–42	7,5
УЦ-38-850	425	10–12	24–38	8,5
СЦН-40	200	16–24	132–293	3,05
ЦН-11-400	200	13–18	92–172	3,57
Мультивихревой сепаратор	Радиус одного завихрения в зоне сепарации $R_v = 6$ мм	6–12	691–2766	2,6

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Простота конструкции и отсутствие трения вихрей о стенки сепаратора с двух из четырех своих сторон позволяют достичь меньшего значения критерия Эйлера Eu относительно циклонов. Необходимо отметить, что мультивихревой сепаратор уступает по Eu на 0,1 только универсальному циклону УЦ-38-250 с диаметром корпуса 250 мм, что входит в погрешность расчетов. В остальном видно, что увеличение диаметра циклона приводит к росту числа Эйлера.

Расчетная фракционная эффективность близкая к 100% мультивихревого сепаратора, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 и СК-ЦН-24 соответствует диаметру уловленных частиц 6, 40, 30, 70 и 20 мкм соответственно. При этом эффективность мультивихревого сепаратора, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 и СК-ЦН-24 в среднем составляет 76,3, 83,1, 81,8, 80,8 и 78,8% для диапазона размеров частиц 1-6, 1-4, 1-9, 1-5 и 1-6 мкм соответственно. Как видно, эффективность улавливания частиц размером менее 6 мкм у некоторых модификаций циклонов незначительно выше значений для мультивихревого сепаратора. Однако, повысить эффективность в случае мультивихревого сепаратора достаточно просто, увеличив высоту сепарационной зоны z , т.е., вытянув сепаратор. На гидравлическое сопротивление это существенным образом не повлияет.

Среди рассмотренных модификаций циклонов УЦ, СЦН-40 и ЦН-11-400 критерий Fr варьировался в диапазоне от 24,32 до 293,5, критерий Eu – от 2,5 до 8,5 при скорости потока от 9,96 до 24 м/с. При этом для мультивихревого сепаратора критерий Fr изменялся от 691,6 до 2766,6, критерий Eu соответствовал 2,6 при скорости потока от 6,38 до 12,76 м/с (табл. 1).

Таким образом, изменение геометрии циклона (выбор разной модификации) может повысить эффективность сепарации за счет увеличения перепада давления в аппарате или уменьшить перепад давления за счет уменьшения эффективности разделения. Нелегко одновременно повысить эффективность разделения и уменьшить перепад давления, изменив геометрию циклона. Применение мультивихревого сепаратора может быть рассмотрено в качестве замены циклонных сепараторов, что является особенно актуальным при его размещении в ограниченных пространствах. При этом эффективность сепарации твердых частиц из атмосферного воздуха мультивихревым сепаратором достигается выше относительно циклонов, а гидравлическое сопротивление, как правило, ниже. К возможным недостаткам мультивихревого сепаратора можно отнести снижение его фракционной эффективности при высокой запыленности потока, так как часть частиц, вероятнее всего, будет повторно уноситься. В дальнейшем ожидается проведение исследований по определению фракционной эффективности мультивихревого сепаратора при различной запыленности воздушного потока. Мультивихревой сепаратор может быть рекомендован к применению в системе комплексной воздухоочистительной установки совместно с другими базовыми устройствами (воздухозаборные козырьки; антиобледенительная система; влагоотделители; ступень фильтров тонкой очистки), что позволит предотвратить попадание находящихся в атмосферном воздухе частиц пыли в проточную часть компрессора газотурбинного двигателя, как следствие, снизить эрозионно-опасное

воздействие этих частиц на проточную часть газотурбинной установки. При этом, срок службы фильтров тонкой очистки увеличится, как следствие периодичность замены и чистки фильтров отразится на затратах по их обслуживанию.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность мультивихревого сепаратора близка к 100% при диаметре частиц более 6 мкм, что существенно выше относительно циклонов разных модификаций, у которых эффективность близкая к 100% достигается при улавливании частиц диаметром 20–70 мкм.

2. Более высокая эффективность мультивихревого сепаратора наглядным образом объясняется расчетными значениями критерия Фруда F_r , превышающими значения для циклонов в 5,1–42,6 раза, что в свою очередь является следствием оригинальности конструкции мультивихревого сепаратора, позволяющей создавать завихрения малого радиуса при невысоких скоростях.

3. Критерий F_r для мультивихревого сепаратора изменялся от 691,6 до 2766,6 при скорости потока от 6,38 до 12,76 м/с.

4. Простота конструкции и отсутствие трения вихрей о стенки сепаратора с двух из четырех своих сторон позволяют достичь меньшего значения критерия Эйлера $E_u = 2,6$ для него относительно циклонов, для которых E_u равен от 2,5 до 8,5. Перепад давления на несколько порядков меньше, чем у аналогов, даже при отсутствии в них уловленных частиц.

Литература

1. Chowdhury T.S., Mohsin F.T., Tonni M.M. et al. A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades // *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 18. pp. 100329. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100329>.

2. Михайлов В.Е., Хоменок Л.А., Шерапов В.В. Проблемы создания современных комплексных воздухоочистительных устройств энергетических ГТУ в России и способы их решения // *Теплоэнергетика*. 2016. № 8. С. 3–9. <https://doi.org/10.1134/S0040363616080075>

3. Suman A., Casari N., Fabbri E., Pinelli M., Di Mare L., Montomoli F. Gas Turbine Fouling Tests: Review, Critical Analysis, Particle Impact Behavior Map // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. V. 141. pp. 032601. <https://doi.org/10.1115/1.4041282>

4. Auda S.A., Ali O.M. Effect of operating conditions and air filters maintenance on the performance and efficiency of gas turbine power plant // *Materials Today: Proceedings*. 2023. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.290>

5. Akduman C., Demirel V., Tezcan F. Filter life comparison of different levels of nanofiber coated cleanable-surface filter for gas turbine // *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. V. 138(4). <http://dx.doi.org/10.1002/app.50820>

6. Блинов В.Л., Зубков И.С., Бродов Ю.М., Мурманский Б.Е. Моделирование течения в тракте комплексного воздухоочистительного устройства ГТУ // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 4. С. 66–83. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83>

7. Mazyan W.I., Ahmadi A., Brinkerhoff J. et al. Enhancement of cyclone solid particle separation performance based on geometrical modification: numerical analysis // *Separation and Purification Technology*. 2018. V. 191. P. 276–285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.040>

8. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Усовершенствованная установка фильтрации газа для подготовки топлива энергетических систем // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 5. С. 124–131. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-124-131>

9. Gao D., Zhou G., Yang Y., Duan J., Kong Y., Meng Q. Design of pulse cleaning device for single-filter cartridge dust collector by multi-factor orthogonal method based numerical simulation // *Powder Technology*. 2021. V. 391. P. 494–509. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.040>

10. Cuiping Y., Guijian L., Haiyan C. Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning // *Powder Technology*. 2013. V. 249. P. 424–430. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.09.017>

11. Tian X., Ou Q., Liu J., Liang Y., Pui D.Y.H. Influence of pre-stage filter selection and face velocity on the loading characteristics of a two-stage filtration system // *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 224. P. 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.031>

12. Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Lemaître P., Nerisson P., Thomas D., Appert-Collin J.C. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles // *Powder Technology*. 2016. V. 289. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.020>

13. Пат. № 208304, Российская Федерация, МПК В04С 5/103. Мультивихревой сепаратор для очистки газов / И.Н. Мадышев, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, В.Э. Зинуров; заявитель и патентообладатель Казанский национальный исследовательский технологический университет. Заявл. 14.07.2021; опубл. 13.12.2021. Бюл. № 35.

14. Зинуров В.Э., Биккулов Р.Я., Дмитриев А.В. и др. Расчет эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с каналами квадратного сечения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022. № 7. С. 10-13.

15. Ватин Н.И., Стрелец К.И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон. СПб.: Изд-во СПбОДЗПП, 2003. 65 с.

16. Злочевский В.Л., Мухопад К.А. Анализ формирования аэропотока в циклоне // Южно-Сибирский научный вестник. 2015. № 4(12). С. 5–13.

17. Циклон СЦН-40 [Электронный ресурс]. URL: https://e-formula.ru/Cyclons/Cyclons_SCN-40.htm

18. Циклон универсальный для улавливания мелкой пыли ЦН-11-400: паспорт [Электронный ресурс]. URL: https://e-formula.ru/Cyclons/tsn_11/tsn_11_Passport.html?tsn_11_400

Авторы публикации

Зинуров Вадим Эдуардович – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Биккулов Рустем Ядкарович – инженер 1 категории кафедры «Оборудование пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Абдуллина Азалия Айратовна – студент, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Chowdhury TS, Mohsin FT, Tonni M.M. et al. A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. *International Journal of Thermofluids*. 2023;18:100329. doi: 10.1016/j.ijft.2023.100329.

2. Mikhaylov VE, Khomenok LA, Sherapov VV. Problems in Creation of Modern Air Inlet Filters of Power Gas Turbine Plants in Russia And Methods of Their Solving. *Thermal Engineering*. 2016;63(8):529-535. doi: 10.1134/S0040601516080073.

3. Suman A, Casari N, Fabbri E, et al. Gas Turbine Fouling Tests: Review, Critical Analysis, Particle Impact Behavior Map. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019;141:032601. doi: 10.1115/1.4041282.

4. Auda SA, Ali OM. Effect of operating conditions and air filters maintenance on the performance and efficiency of gas turbine power plant. *Materials Today: Proceedings*. 2023. In Press. doi: 10.1016/j.matpr.2023.01.290.

5. Akduman C, Demirel V, Tezcan F. Filter life comparison of different levels of nanofiber coated cleanable-surface filter for gas turbine. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021;138(4). doi: 10.1002/app.50820.

6. Blinov VL, Zubkov IS, Brodov YuM, et al. Modelirovanie techeniya v trakte kompleksnogo vozdukhoochistitel'nogo ustroystva GTU. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(4):66–83. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-66-83.

7. Mazyan W.I., Ahmadi A., Brinkerhoff J. et al. Enhancement of cyclone solid particle separation performance based on geometrical modification: numerical analysis. *Separation and Purification Technology*. 2018;191:276-285. doi: 10.1016/j.seppur.2017.09.040.

8. Zamalieva A.T., Ziganshin M.G. Usovershenstvovannaya ustanovka fil'tratsii gaza dlya podgotovki topliva energeticheskikh system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019;21(5):124–131. doi: 10.30.724/1998-9903-2019-21-5-124-131.
9. Gao D, Zhou G, Yang Y. et al. Design of pulse cleaning device for single-filter cartridge dust collector by multi-factor orthogonal method based numerical simulation. *Powder Technology*. 2021;391:494–509. doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.040.
10. Cuiping Y, Gujian L, Haiyan C. Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning. *Powder Technology*. 2013;249:424–430. doi: 10.1016/j.powtec.2013.09.017.
11. Tian X, Ou Q, Liu J. et al. Influence of pre-stage filter selection and face velocity on the loading characteristics of a two-stage filtration system. *Separation and Purification Technology*. 2019;224:227–236. doi: 10.1016/j.seppur.2019.05.031.
12. Bourrous S, Bouilloux L, Ouf F.-X. et al. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. *Powder Technology*. 2016;289:109-117. doi: 10.1016/j.powtec.2015.11.020.
13. Madyshev IN, Dmitriev AV, Dmitrieva OS. Multivortex separator for gas cleaning. Patent RF, no. 208304; 2021.
14. Zinurov VE, Bikkulov RYa, Dmitriev AV. et al. Raschet effektivnosti ulavlivaniya melkodispersnykh chastits separatsionnym ustroystvom s kanalami kvadratnogo secheniya. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2022;(7):10-13.
15. Vatin NI, Strelets KI. *Ochistka vozdukhа pri pomoshchi apparatov tipа tsiklon*. Izd-vo SPbODZPP, Sankt-Peterburg 2003. 65 p.
16. Zlochevsky VL, Mukhopad KA. Analiz formirovaniya aeropotoka v tsiklone. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik*. 2015;12(4):5-13.
17. Tsiklon STsN-40. Available from: https://e-formula.ru/Cyclons/Cyclons_SCN-40.htm.
18. Tsiklon universal'nyi dlya ulavlivaniya melkoi pyli TsN-11-400: passport. Available from: https://e-formula.ru/Cyclons/tsn_11/tsn_11_Passport.html?tsn_11_400/

Authors of the publication

Vadim E. Zinurov – PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rustem Ja. Bikkulov – Engineer 1st category of the Department «Food Production Equipment» of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Oksana S. Dmitrieva – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department Food Production Equipment of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Azaliya A. Abdullina – Student of the Department «Economics and Organization of Production» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы
Смежные специальности в рамках группы научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

Получено 02.05.2023 г.

Отредактировано 29.05.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.



**СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СОВМЕСТНО С
КОТЕЛЬНЫМИ НА НУЖДЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ
АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)**

А.В. Бежан¹, Ю.Н. Звонарева², Р.А. Пономарев²

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера - филиал ФГБУН
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской
академии наук», г. Апатиты, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4602-5161>, a.bezhan@ksc.ru

Резюме: В современной России важным условием стабильного развития и дальнейшего существования удаленных районов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является обеспечение комфортных условий проживания местного населения. Особая роль в этом процессе отведена системам теплоснабжения, надежная и бесперебойная работа которых сопряжена с различными проблемами. Основные проблемы связаны с повышенными денежными расходами на покупку органического топлива и его завоз в удаленные районы. Данное обстоятельство приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому их дальнейшее существование без государственных субсидий становится не возможным. В этих условиях в удаленных районах с повышенным потенциалом ветра одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии, может быть использование ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с котельными на нужды теплоснабжения. **ЦЕЛЬ.** На примере Мурманской области показать, что использование ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах является хорошим решением для снижения себестоимости тепловой энергии. **МЕТОДЫ.** Сравнение себестоимости тепловой энергии при теплоснабжении только от котельных и при использовании ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что использование ВЭУ совместно с котельными мощностью более 0,1 Гкал/ч на нужды теплоснабжения в удаленных районах Мурманской области позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива стоимостью 25000-72000 руб/т у.т. и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%. Для котельных меньшей мощности эффект от использования ВЭУ снижается, причем чем меньше мощность котельной, тем больше использование ВЭУ оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты позволяют оценить перспективы использования ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах АЗРФ с точки зрения эффективности такого использования.

Ключевые слова: ветроэнергетика; теплоснабжение; себестоимость тепловой энергии; технико-экономическая оценка; Арктическая зона Российской Федерации.

Благодарности: Основные результаты исследования получены в рамках выполнения – гос. задания №075-03-2023-91 от 16.01.2023 и гос. задания №FMEZ-2022-0014.

Для цитирования: А.В. Бежан, Ю.Н. Звонарева, Р.А. Пономарев. Снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах арктической зоны российской федерации (на примере Мурманской области) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 128-138. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-128-138.

REDUCTION OF THE PRIME COST OF THERMAL ENERGY BY THE UTILIZATION OF WIND POWER PLANTS IN CONJUNCTION WITH BOILER HOUSES FOR HEAT SUPPLY IN REMOTE AREAS OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION (ON THE EXAMPLE OF THE MURMANSK REGION)

AV. Bezhan¹, YuN. Zvonareva², RA. Ponamarev²

¹Northern Energetics Research Centre - Branch of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

a.bezhan@ksc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4602-5161>, a.bezhan@ksc.ru

Abstract: Providing comfortable living conditions of the local community is the important condition of the stable development and continued existence of remote areas of the Arctic Zone of the Russian Federation (AZRF) in modern Russia. The particular role played in this process is assigned to heat supply systems whose reliable and uninterrupted operation is fraught with various problems. The main ones are related to increased costs for the purchase of organic fuel and its delivery to remote areas. This circumstance leads to the fact that the prime cost of thermal energy is higher than the rates level, resulting in unprofitable activity of heat generating facilities, so their continued existence becomes impossible without government subsidies. Under these conditions one of the ways to save imported organic fuel and therefore reduce the prime cost of thermal energy can be the utilization of wind power plants (WPPs) in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas with increased wind potential. **THE PURPOSE.** It should be shown on the example of the Murmansk region that the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas is a good decision to reduce the prime cost of thermal energy. **METHODS.** The comparison of the prime cost of thermal energy in a case of heat supply only from boiler houses with the one when utilizing WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply. **RESULTS.** It is shown that the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses with a capacity of more than 0.1 Gcal/h for heat supply in remote areas of the Murmansk region saves 60-90% of organic fuel worth 25,000-72,000 rubles/tce at boiler houses and thereby reduces the prime cost of thermal energy by 10-60%. An effect of the utilization of WPPs is reduced for boiler houses of lower capacity, with the lower the boiler house capacity, the more the utilization of WPP being economically impractical compared to a case of heat supply only from a boiler house. **CONCLUSION.** The results obtained allow us to assess the prospects of the utilization of WPPs in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas of AZRF in terms of the effectiveness of such utilization.

Keywords: wind energy; heat supply; cost of thermal energy; feasibility study; Arctic zone of the Russian Federation.

Acknowledgments: The main results of the study were obtained in the framework of the implementation - state. tasks No. 075-03-2023-91 dated 01.16.2023 and state. tasks No. FMEZ-2022-0014.

For citation: Khusnutdinov RR, Mozhukhi GV, Khusnutdinova NR, Salakhutdinov BM. Reduction of the prime cost of thermal energy by the utilization of wind power plants in conjunction with boiler houses for heat supply in remote areas of the arctic zone of the russian federation (on the example of the Murmansk region). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3): 128-138. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-128-138.

Введение (Introduction)

В современной России важным условием стабильного развития и дальнейшего существования районов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является обеспечение комфортных условий проживания местного населения. Особая роль в этом процессе отведена системам теплоснабжения, надежная и бесперебойная работа которых сопряжена с различными проблемами. Особенно остро это проявляется в удаленных районах АЗРФ, где имеется множество потребителей тепловой энергии, испытывающих

различные трудности с организацией теплоснабжения. Прежде всего, это связано с суровыми природно-климатическими условиями, усложняющими доставку органического топлива в удаленные районы и являющимися причиной повышенных потребностей в тепловой энергии на протяжении продолжительного отопительного периода, достигающего в отдельных районах АЗРФ 9 месяцев и более. Вместе с этим удаленность потребителей от мест добычи органического топлива, конечная стоимость которого у потребителей может быть в несколько раз выше по сравнению с отпускной ценой у поставщиков, является основной причиной повышенных денежных расходов на покупку такого топлива и его завоз в удаленные районы [1]. Данное обстоятельство приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому государство вынуждено субсидировать покупку и завоз органического топлива в удаленные районы АЗРФ [2]. В такой ситуации хорошим решением для экономии органического топлива и сокращения субсидий на его покупку, может быть максимальное использование местных возобновляемых источников энергии [3].

В районах АЗРФ с повышенным потенциалом ветра имеется возможность использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с котельными, работающими на дорогом привозном органическом топливе, на нужды теплоснабжения [4-7]. Одним из таких районов является Мурманская область, которая расположена в северо-западной части АЗРФ. Исследования [8-11] показали, что наибольшие среднегодовые скорости ветра в Мурманской области наблюдаются в прибрежных районах Баренцева и Белого морей и составляют 5-9 м/с на высоте 10 метров от поверхности земли. При этом наибольшие значения скорости ветра отмечаются в зимнее время, когда и существует наибольшая потребность в тепловой энергии [12]. Таким образом, можно констатировать, что в регионе складываются благоприятные условия для эффективного использования энергии ветра на нужды теплоснабжения для широкого круга удаленных потребителей.

Общая характеристика теплоснабжения удаленных потребителей Мурманской области

В зависимости от направления хозяйственной деятельности и производственных потребностей, социальных функций и объёмов теплопотребления в Мурманской области можно выделить следующие группы удалённых потребителей: маяки и метеостанции, объекты военного назначения, небольшие населенные пункты (н.п.). Теплоснабжение этих потребителей осуществляется в основном от котельных небольшой мощности или от простых огневых печей, работающих на дровах и угле. Максимальная тепловая нагрузка для одного потребителя в большинстве случаев не превышает 5 Гкал/ч (табл. 1).

Таблица 1

Тепловая нагрузка потребителей тепловой энергии, расположенных в удаленных районах Мурманской области

Table 1

The thermal load of thermal energy consumers located in remote areas of the Murmansk region

Название потребителя	Величина тепловой нагрузки для одного потребителя, Гкал/ч
Маяки и метеостанции	до 0.02
Объекты военного назначения	около 0.1-0.5
Небольшие н.п.	от 1-3 до нескольких десятков

**Источник: составлено автором. Source compiled by the author*

Мурманская область не имеет предприятий по добыче органических видов топлива (угля, нефти, газа). Поэтому для производства тепловой энергии преимущественно используется привозное органическое топливо, доставляемое из других регионов России. В основном это уголь и мазут, реже дизельное топливо и сжиженный газ (табл. 2). По состоянию на 2022 год стоимость такого топлива с учетом транспортных расходов после доставки потребителю в центральные промышленно развитые районы Мурманской области в среднем составляла 70000 рублей за тонну дизельного топлива, 23000 рублей за тонну мазута и 5000 рублей за тонну угля.

Необходимо отметить, что, начиная с апреля 2022 года, стоимость мазута в России имела тенденцию к уменьшению, что связано со снижением спроса со стороны зарубежных стран, главным образом ЕС и США, которые в марте 2022 года ввели эмбарго на нефтепродукты из России. В результате этого нефтеперерабатывающие заводы оказались под угрозой переполнения своих мазутных хранилищ и были вынуждены продавать мазут

по сниженным ценам. Можно предположить, что данная ситуация имеет временный характер и после стабилизации обстановки на мировом рынке нефтепродуктов стоимость мазута снова будет расти.

Совсем по-другому обстоит дело в удаленных районах, большинство потребителей тепловой энергии которых находится на побережье Баренцева и Белого морей, где автомобильные трасы плохо развиты, а железные дороги и вовсе отсутствуют. По этой причине в прибрежные районы топливо (в основном это дизельное топливо и мазут) доставляется по морю в период летней навигации, где морские суда производят поочередную отгрузку топлива всем населенным пунктам. Далее топливо доставляется от побережья во внутренние районы Мурманской области. Такая многоэтапная доставка органического топлива приводит к его удорожанию, конечная стоимость которого у потребителей в зависимости от их расположения может возрасти в среднем в 1,5 раза и составлять около 105000 руб/т за дизельное топливо и 35000 руб/т за мазут. В пересчете на условное топливо дизельное топливо и мазут будут стоить соответственно 72000 и 25000 руб/т у.т. Высокая стоимость топлива оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели работы котельных и приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов. Вместе с этим для котельных небольшой мощности свойственны низкий уровень автоматизации, высокие удельные расходы топлива на выработку тепловой энергии, а также низкий коэффициент полезного действия. Все это создает дополнительные финансовые проблемы, связанные с содержанием и обслуживанием таких котельных. Для оценки влияния этих факторов на себестоимость тепловой энергии была проведена серия расчетов для следующего мощностного ряда котельных: 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч.

Таблица 2

Структура потребления топлива (включая электроэнергию, затраченную на прямой нагрев воды) тепловыми электростанциями и котельными Мурманской области¹

Table 2

The structure of fuel consumption by thermal power plants and boiler houses of the Murmansk region (including electricity spent on the direct water heating)

Вид топлива	Газ сжиженный	Дизельное топливо	Мазут	Уголь	Дрова	Электроэнергия
Расход, т у.т.	256	1 740	1 388 542	329 908	1 613	56 946
Доля в топливном балансе, %	0,01	0,10	78,05	18,54	0,09	3,20

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Расчет себестоимости тепловой энергии на котельных

Годовые эксплуатационные расходы котельной $Z_{\text{год}}$ (руб/год) складываются из затрат на топливо $Z_{\text{т}}$, оплату труда $Z_{\text{зп}}$, амортизацию и текущий ремонт $Z_{\text{ка}}$, и прочих расходов $Z_{\text{пр}}$.

Топливная составляющая эксплуатационных расходов котельной может быть найдена по следующей формуле:

$$Z_{\text{т}} = (0,143 \cdot C_{\text{т}} \cdot Q_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}) / (\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пт}}), \quad (1)$$

где 0,143 – коэффициент перевода из Гкал в тонны условного топлива, т у.т./Гкал; $C_{\text{т}}$ – стоимость условного топлива, руб/т у.т.; $Q_{\text{к}}$ – установленная мощность котельной, Гкал/ч; $h_{\text{к}}$ – число часов использования установленной мощности котельной в году, ч; $\eta_{\text{к}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) котлов, ед.; $\eta_{\text{пт}} = 0,95$ – коэффициент, учитывающий потери топлива при транспортировке, разгрузке, хранении и других топливно-транспортных операциях для жидкого топлива, ед. [13].

Затраты на топливо сильно зависят от отпускной цены у поставщиков, удаленности потребителей и развития дорожно-транспортной системы. Для учета влияния этих факторов расчеты были проведены для двух вариантов стоимости условного топлива: 25000 и 72000 руб/т у.т.

В зависимости от назначения, режима работы и природно-климатических условий района расположения котельной число часов использования ее установленной мощности в

¹ Распоряжение Губернатора Мурманской области от 30.04.2021 №133-рг "Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Мурманской области на период 2022 - 2026 годов" // Опубликовано 30.04.2021 на официальном сайте Минэнерго и ЖКХ Мурманской области. <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/>

среднем может составлять 3000-4000 часов. В расчетах этот показатель принят на уровне 3500 часов.

КПД котлов зависит от многих факторов и приближенно может быть принят равным 0,6; 0,6; 0,65; 0,7; 0,7 и 0,75 для котельных, работающих на жидком топливе, соответственно мощностью 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч [14].

Ежегодные затраты на оплату труда включают в себя заработную плату обслуживающего персонала и отчисления на социальные нужды и математически могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$Z_{\text{Кэл}} = n_{\text{шт}} \cdot Q_{\text{К}} \cdot Z_{\text{п}} \cdot 12,$$

где $n_{\text{шт}}$ - штатный коэффициент обслуживающего персонала, чел./Гкал/ч; $Z_{\text{п}}$ - месячная заработная плата и отчисления на социальные нужды одного работника котельной, руб/чел.; 12 - число месяцев в году, ед.

Штатный коэффициент зависит от тепловой производительности котельной и вида сжигаемого топлива и ориентировочно может быть определен в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3
Значения штатных коэффициентов для котельных, работающих на жидком топливе [15]

Table 3

The values of staff coefficients for boiler houses powered by liquid fuel [15]

Установленная мощность котельной, Гкал/ч	0,02	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
Штатный коэффициент, чел./Гкал/ч	150	40	12	7	4	2,8

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Месячная заработная плата и отчисления на социальные нужды одного работника котельной в сумме принимались равным 115000 рублей, что соответствует средней месячной оплате труда работников по Мурманской области в 2022 году.

Затраты на амортизацию и текущий ремонт оборудования и строений можно определить по следующей формуле:

$$Z_{\text{Ка}} = N_{\text{Ка}} \cdot k_{\text{К}} \cdot Q_{\text{К}},$$

где $N_{\text{Ка}} = 0,1$ - средняя норма амортизационных отчислений по котельной от капиталовложений в ее строительство и монтаж, ед.; $k_{\text{К}}$ - удельные капиталовложения в котельную, работающую на жидком топливе, руб/Гкал/ч).

В качестве исходных данных о величине капиталовложений в котельные была использована статистическая информация, полученная при обработке инвестиционных программ теплоснабжающих организаций Мурманской области по строительству, модернизации и реконструкции систем теплоснабжения, а также предложений ряда предприятий, занимающихся изготовлением и реализацией котельных, работающих на жидком топливе. Согласно полученным данным, удельные капиталовложения в такие котельные мощностью 0.02, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 и 5.0 Гкал/ч составили соответственно 78.8; 31,6; 14,1; 10,6; 7,9 и 5,2 млн. руб/Гкал/ч).

При расчете прочих расходов можно воспользоваться следующим равенством:

$$Z_{\text{Кпр}} = 0,2 \cdot (Z_{\text{Кэл}} + Z_{\text{Ка}}),$$

где 0,2 - коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов, принимаемый в размере 20% затрат на амортизацию, текущий ремонт и оплату труда.

Таким образом, зная все составляющие годовых эксплуатационных расходов котельной, можно определить себестоимость тепловой энергии, используя следующее выражение:

$$C_{\text{К}} = (Z_{\text{т}} + Z_{\text{Кэл}} + Z_{\text{Ка}} + Z_{\text{Кпр}}) / (Q_{\text{К}} \cdot h_{\text{К}}), \text{ руб/Гкал.}$$

На рисунке 1 представлены результаты расчетов себестоимости тепловой энергии на котельных в удаленных районах Мурманской области. Из рисунка видно, что на котельных мощностью более 1 Гкал/ч себестоимость тепловой энергии находится ниже 20000 руб/Гкал. Тогда как на более мелких котельных она возрастает почти до 90000 руб/Гкал. В этих условиях одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии на котельных, может быть использование ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения.

Расчет себестоимости тепловой энергии при использовании ветроэнергетических установок совместно с котельными

Основной эффект от использования ВЭУ совместно с котельной на нужды теплоснабжения можно пояснить следующим образом. Если теплоснабжение осуществляется только от котельной, то доля участия котельной в теплоснабжении равна единице ($\gamma = 1$). Использование ВЭУ совместно с котельной способствует тому, что доля участия котельной в теплоснабжении снижается ($\gamma < 1$), соответственно сокращается и расход органического топлива, используемого на котельной. С учетом сказанного формулу (1) можно представить в виде:

$$Z_{т+ВЭУ} = (0,143 \cdot \Pi_{г} \cdot Q_{к} \cdot h_{к} \cdot \gamma) / (\eta_{к} \cdot \eta_{пт}). \quad (2)$$

В [16] в результате обработки обширного материала, включающего в себя синхронные записи температуры наружного воздуха и скорости ветра – основных факторов, обуславливающих объемы теплопотребления, была получена аналитическая зависимость, определяющая участие котельной в теплоснабжении:

$$\gamma = \exp \left[-3,2 \cdot \left(\frac{V_{год}}{V_p} \right)^2 \cdot \beta \right], \quad (3)$$

где $V_{год}$ – среднегодовая скорость ветра на оси ветроколеса, м/с; V_p – расчетная скорость ветра на оси ветроколеса, м/с; $\beta = Q_{ВЭУ} / Q_{к}$ – соотношение мощностей ВЭУ и котельной, ед.

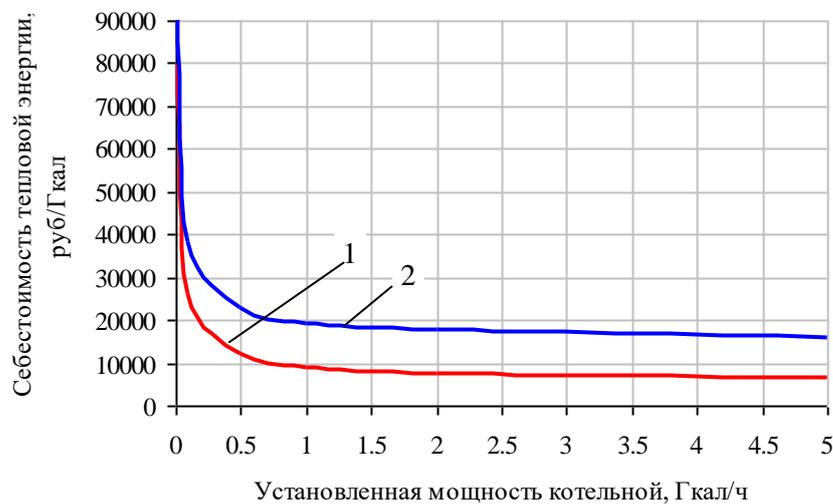


Рис. 1. Себестоимость тепловой энергии на котельных в удаленных районах Мурманской области при стоимости условного топлива: 1 – 25000 и 2 – 72000 руб/т у.т. *Fig. 1. The prime cost of thermal energy in boiler houses in remote areas of the Murmansk region at the cost of coal equivalent: 1 – 25,000 and 2 – 72,000 rubles/tce*

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Подставляя (3) в (2), можно получить формулу для определения затрат на топливо при использовании ВЭУ совместно с котельной на нужды теплоснабжения:

$$Z_{т+ВЭУ} = (0,143 \cdot \Pi_{г} \cdot Q_{к} \cdot h_{к} \cdot \exp \left[-3,2 \cdot \left(\frac{V_{год}}{V_p} \right)^2 \cdot \beta \right]) / (\eta_{к} \cdot \eta_{пт}).$$

Годовые эксплуатационные расходы ВЭУ $Z_{ВЭУгод}$ (руб./год) в общем случае складываются из затрат на оплату труда $Z_{ВЭУзн}$, амортизацию и текущий ремонт $Z_{ВЭУа}$, и прочих расходов $Z_{ВЭУпр}$.

Для обслуживания ВЭУ потребуется один сотрудник, работающий на 1/2 ставки с заработной платой и отчислениями на социальные нужды $Z_{ВЭУзн} = 690000$ рублей в год (57500 рублей в месяц), что соответствует половине средней годовой оплате труда работников по Мурманской области в 2022 году.

Затраты на амортизацию и текущий ремонт можно определить по формуле:

$$Z_{ВЭУа} = N_{ВЭУам} \cdot k_{ВЭУ} \cdot Q_{ВЭУ},$$

где $N_{ВЭУам} = 0,07$ – средняя норма амортизационных отчислений для ВЭУ от капиталовложений в ее строительство и монтаж, ед.; $k_{ВЭУ}$ – удельные капиталовложения в ВЭУ, руб/(Гкал/ч), $Q_{ВЭУ}$ – установленная мощность ВЭУ, Гкал/ч.

Удельные капиталовложения современных ВЭУ мощностью от 0.02 до 5.0 Гкал/ч с учетом дополнительных расходов на транспортировку, сооружение и ввод в эксплуатацию находятся в диапазоне от 200 до 90 млн. руб/(Гкал/ч) и хорошо аппроксимируются уравнением следующего вида (рис. 2):

$$k_{ВЭУ} = 112,47 \cdot Q_{ВЭУ}^{-0,1434}$$

С учетом сказанного формулу для определения затрат на амортизацию и текущий ремонт можно переписать следующим образом:

$$З_{ВЭУа} = N_{ВЭУам} \cdot (112,47 \cdot Q_{ВЭУ}^{-0,1434}) \cdot Q_{ВЭУ},$$

Прочие расходы обычно принимаются в диапазоне 1-5% от суммы всех остальных эксплуатационных расходов ВЭУ [17]:

$$З_{ВЭУпр} = 0,05 \cdot (З_{ВЭУзп} + З_{ВЭУа}),$$

где 0,05 – коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов, принимаемый в размере 5% затрат на амортизацию, текущий ремонт и оплату труда.

При использовании ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения формулу для определения себестоимости тепловой энергии можно записать следующим образом, руб/Гкал:

$$C_{к+ВЭУ} = (З_{т+ВЭУ} + З_{кзп} + З_{ка} + З_{кпр} + З_{ВЭУзп} + З_{ВЭУа} + З_{ВЭУпр}) / (Q_k \cdot h_k).$$

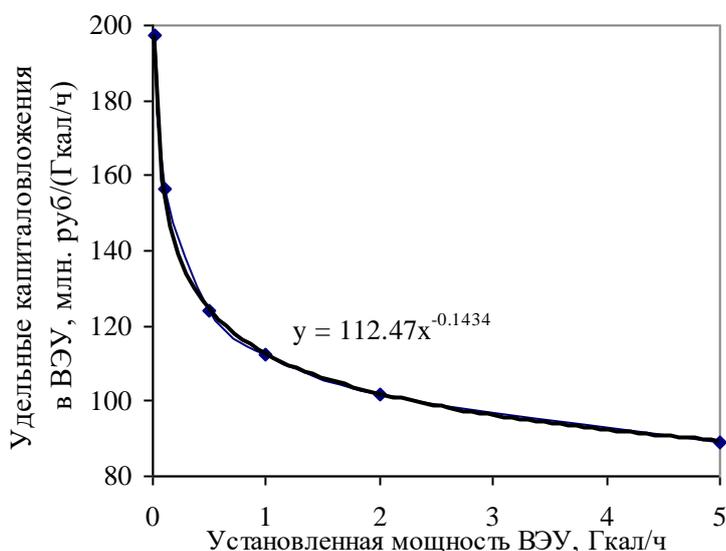


Рис. 2. Зависимость удельных капиталовложений в ВЭУ от их установленной мощности Fig. 2. The dependence of specific investments in WPPs on their installed capacities

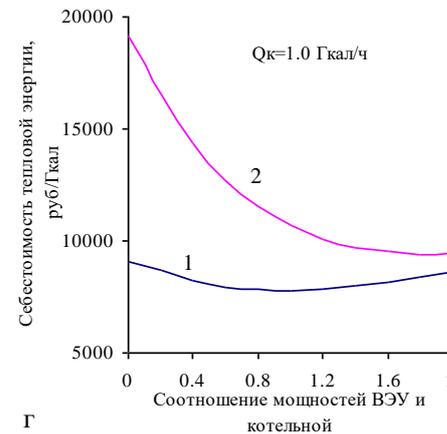
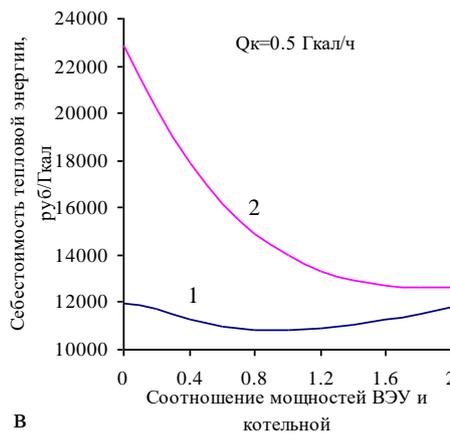
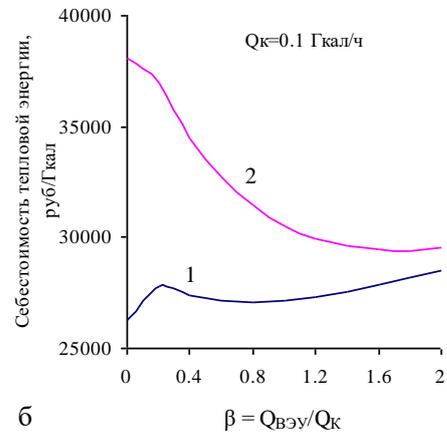
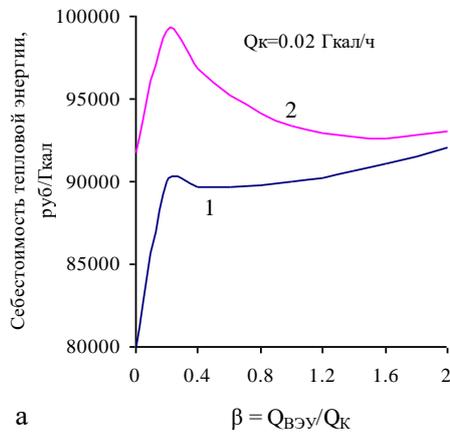
*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Результаты расчетов себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными представлены в виде графиков на рисунке 3. Эти графики позволяют ответить на вопрос, возможно ли (и в каких пределах) снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ВЭУ. Видно, что в зависимости от стоимости топлива, мощности котельной и ее соотношения с мощностью ВЭУ (параметра β) графики имеют разный характер.

Обратимся к рисункам 3а и 3б (кривые 1) из которых видно, что при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. использование ВЭУ совместно с котельными мощностью менее 0,1 Гкал/ч приводит к увеличению себестоимости тепловой энергии, и поэтому этот вариант использования ВЭУ оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной. Это объясняется тем, что у котельных малой мощности топливная составляющая в общей структуре их эксплуатационных расходов незначительна по сравнению с другими затратами и поэтому экономия топлива на котельных за счет использования ВЭУ в данном случае никак не способствует снижению себестоимости тепловой энергии. Данная ситуация сохраняется и при стоимости топлива 72000 руб/т у.т., но только для мелких котельных мощностью около 0,02 Гкал/ч (рис. 3а, кривая 2). По мере увеличения мощности котельных использование ВЭУ уже оказывается эффективным, причем чем больше мощность используемой ВЭУ, тем больший экономический эффект может быть достигнут. Сказанное иллюстрирует рис. 3б (кривая 2), из которого видно, что использование ВЭУ мощностью в 1,2 – 2 раза превышающей мощность котельной ($Q_k = 0,1$ Гкал/ч) позволяет снизить себестоимость тепловой энергии с 38000 до примерно 30000 руб/Гкал.

На рисунках с 3в по 3е изображены графики изменения себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными мощностью более 0,5 Гкал/ч. Для таких котельных использование ВЭУ оказывается эффективным даже при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. По мере увеличения мощности ВЭУ ($\beta > 0$, $Q_K = \text{const}$) экономия топлива на котельной возрастает, в результате чего себестоимость тепловой энергии снижается. При этом, чем больше стоимость топлива, тем интенсивнее происходит снижение себестоимости тепловой энергии. Однако, снижение себестоимости тепловой энергии возможно до определенного минимума, после которого дальнейшее увеличение мощности ВЭУ не целесообразно.

Существует некоторое оптимальное соотношение мощностей ВЭУ и котельной $\beta_{\text{опт}}$, обеспечивающее минимум себестоимости тепловой энергии. Как показали расчеты, при стоимости топлива 25000 руб/т у.т. и мощности котельной 0,5 Гкал/ч оптимальной является мощность ВЭУ, равная 0,7-1,25 мощности котельной. Для котельных мощностью 1,0, 2,0 и 5,0 Гкал/ч $\beta_{\text{опт}}$ составляет соответственно 0,7-1,3, 0,8-1,35 и 0,9-1,45. При стоимости топлива 72000 руб/т у.т. минимум себестоимости тепловой энергии находится уже в интервале более высоких значений $\beta_{\text{опт}}$ и для котельных мощностью 0,1, 0,5, 1,0, 2,0 и 5,0 Гкал/ч составляет примерно 1,6-2,0. При таких значениях $\beta_{\text{опт}}$ использование ВЭУ совместно с котельными на нужды теплоснабжения позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%.



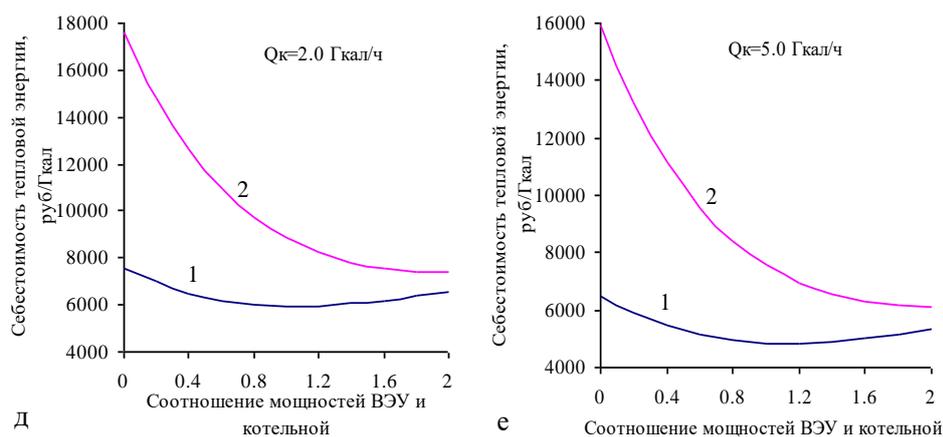


Рис. 3. Графики изменения себестоимости тепловой энергии при использовании ВЭУ совместно с котельными мощностью от 0.02 до 5.0 Гкал/ч в зависимости от стоимости топлива и параметра β : 1 и 2 – соответственно при стоимости топлива 25000 и 72000 руб/т у.т.

Fig. 3. The graphs of changes in the prime cost of thermal energy when using WPPs in conjunction with boiler houses with capacities from 0.02 to 5.0 Gcal/h, depending on the cost of fuel and parameter β : 1 and 2 – at the fuel cost of 25,000 and 72,000 rubles/tce respectively

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Заключение (Conclusions)

В Мурманской области, как и на всей территории Арктической зоны Российской Федерации, имеется множество удаленных потребителей тепловой энергии, испытывающих различные трудности с организацией теплоснабжения. Основные трудности связаны с тем, что конечная стоимость органического топлива после дополнительных расходов на его доставку удаленным потребителям тепловой энергии может возрастать в несколько раз по сравнению с отпускной ценой у поставщиков. В свою очередь высокая стоимость топлива приводит к тому, что себестоимость тепловой энергии оказывается больше уровня тарифов, в результате чего деятельность теплогенерирующих объектов получается убыточной, и поэтому их дальнейшее существование без государственных субсидий становится не возможным.

В этих условиях в районах с повышенным потенциалом ветра одним из направлений экономии привозного органического топлива, а, следовательно, и снижения себестоимости тепловой энергии, может быть использование ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения. Исследование показало, что использование ветроэнергетических установок совместно с котельными мощностью более 0,1 Гкал/ч на нужды теплоснабжения позволяет сэкономить на котельных 60-90% органического топлива стоимостью 25000-72000 руб/т у.т. и тем самым снизить себестоимость тепловой энергии на 10-60%. Для котельных меньшей мощности эффект от использования ветроэнергетических установок снижается, причем чем меньше мощность котельной, тем больше использование ветроэнергетических установок оказывается экономически не целесообразным по сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной.

Литература

1. Biev A.A., Serova N.A. Features of the organization of fuel supplies to the Arctic regions of Russia: assessment of transport conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 539. pp. 012017.
2. Кузнецов Н.М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации: монография. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 92 с.
3. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. 2012. №3(7). С. 22-29.
4. Бежан А.В. Оценка эффективности сооружения ветроэнергетических установок на нужды теплоснабжения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. № 4. С. 366–380.
5. Postnikov I.V. A reliability assessment of the heating from a hybrid energy source based on combined heat and power and wind power plants // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 221. pp. 108372.

6. Bezhan A.V. Heat supply efficiency improvement in the Arctic regions with an increased wind potency // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 976. pp. 012006.
7. Zheng J., Zhou Zh., Zhao J., Wang J. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. pp. 865-874.
8. Minin V.A., Bezhan A.V. Wind energy resources of the Kola peninsula (Russia) // *Dewi Magazin*. 2012. N41. pp. 15-16.
9. Минин В.А., Целищева М.А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования // *Арктика: экология и экономика*. 2023. Т. 13. № 1. С. 72-84.
10. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф, 2008. 584 с.
11. Duan C., Wang Z., Dong S., et al. Wind characteristics and wind energy assessment in the Barents Sea based on ERA-Interim reanalysis // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2018. Vol. 47, N4. pp. 415—428.
12. Минин В.А., Дмитриев Г.С., Минин И.В. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова // *Известия РАН. Энергетика*. 2001. № 1. С. 45-53.
13. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я. Производственные и отопительные котельные / 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.
14. Барабанер Х.З. Теплоснабжение сельских населенных пунктов. Таллинн: Валгус, 1976. 196 с.
15. Минин В.А., Бежан А.В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей европейского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2009. 56 с.
16. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.
17. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. и др. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / Под редакцией В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 144 с.

Авторы публикации

Бежан Алексей Владимирович - научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН».

Звогарева Юлия Николаевна — канд.техн.наук. доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Пономарев Роман Андреевич – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Biev A.A., Serova N.A. Features of the organization of fuel supplies to the Arctic regions of Russia: assessment of transport conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 539:012017. doi:10.1088/1755-1315/539/1/012017
2. Kuznetsov N.M. *Upravleniye energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: monografiya*. Apatity: Izdatel'stvo FITS KNTS RAN, 2020. (In Russ).
3. Smolentsev D.O. Razvitiye energetiki Arktiki: problemy i vozmozhnosti maloy generatsii. *Arctic: Ecology and Economy*. 2012, 3(7):22-29. (In Russ).
4. Bezhan A.V. Efficiency Estimation of Constructing of Wind Power Plant for the Heat Supply Needs. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2022, 65(4):366–380. doi:10.21122/1029-7448-2022-65-4-366-380
5. Postnikov I.V. A reliability assessment of the heating from a hybrid energy source based on combined heat and power and wind power plants. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022, 221:108372. doi:10.1016/j.res.2022.108372

6. Bezhan A.V. Heat supply efficiency improvement in the Arctic regions with an increased wind potency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 976:012006. doi:10.1088/1757-899x/976/1/012006
7. Zheng J., Zhou Zh., Zhao J., Wang J. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration. *Applied Energy*. 2018, 211:865-874. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.080
8. Minin V.A., Bezhan A.V. Wind energy resources of the Kola peninsula (Russia). *Dewi Magazin*. 2012, 41:15-16.
9. Minin, V. A., Tselishcheva, M. A. Wind resources of the Western sector of the Arctic zone of Russian Federation and possible areas of their use. *Arctic: ecology and economy*. 2023, 1:72—84. (In Russ). doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84
10. Nikolayev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *National Cadastre of Wind energy Resources of Russia and methodological bases for their determination*. Moscow: Atmosgraf, 2008. (In Russ).
11. Duan C., Wang Z., Dong S., et al. Wind characteristics and wind energy assessment in the Barents Sea based on ERA-Interim reanalysis. *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2018, 47(4):415–428. doi:10.1515/ohs-2018-0039
12. Minin V.A., Dmitriev G.S., Minin I.V. Perspektivy osvoyeniya resursov vetrovoy energii Kol'skogo poluoostrova. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2001, 1:45-53. (In Russ).
13. Buznikov E.F., Roddatis K.F., Berzins E.Ya., editors. *Proizvodstvennyye i otopitel'nyye kotel'nyye*. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1984. (In Russ).
14. Barabaner KH.Z. *Teplosnabzheniye sel'skikh naseleennykh punktov*. Tallinn: Valgus, 1976. (In Russ).
15. Minin V.A., Bezhan A.V. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley yevropeyskogo Severa*. Apatity: Izd. Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 2009. (In Russ).
16. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. *Ispol'zovaniye energii vetra v rayonakh Severa*. Leningrad: Nauka, 1989. (In Russ).
17. Burmistrov A.A., Vissarionov V.I., Deryugina G.V., et al. editors. *Metody rascheta resursov vozobnovlyayemykh istochnikov energii: uchebnoye posobiye*. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. (In Russ).

Authors of the publication

Bezhan Alexey Vladimirovich - Researcher, Northern Energetics Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia.

Zvонарева Yulia Nikolaevna - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Рonomarev Roman Andreevich - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 02.05.2023 г.

Отредактировано 29.05.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.



ОПТИМАЛЬНАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ИСТОЧНИКЕ ТЕПЛОТЫ И ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЕЁ ИЗМЕНЕНИЯ НА ПОТЕРИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Ахметова И.Г., Лапин К.В.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID:0000-0002-7082-2005, irina_akhmetova@mail.ru; lapinkv@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* В современных реалиях эксплуатация тепловых сетей системы централизованного теплоснабжения сопряжена с постоянным поиском способов минимизации потерь тепловой энергии. *МЕТОДЫ.* Поэтому высокую актуальность приобретает задача минимизации потерь тепловой энергии при осуществлении регулирования температуры, подаваемой теплоносителя от источников теплоты. При эксплуатации тепловых сетей централизованного теплоснабжения в Российской Федерации регулирование подачи теплоты потребителям в течение отопительного периода осуществляется в зависимости от температуры наружного воздуха, как правило, двумя способами: качественный способ за счет изменения температуры воды в подающей магистрали тепловой сети; качественно-количественный за счет изменения температуры и расхода воды в подающей магистрали тепловой сети. Применяемые способы регулирования связаны с необходимостью поддержания стабильного гидравлического режима тепловых сетей. Действия по регулированию подачи теплоты потребителям выполняются на источнике тепловой энергии в соответствии с указанием диспетчера тепловых сетей согласно утвержденному температурному графику для системы теплоснабжения. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе приводятся результаты исследования зависимости изменения фактических тепловых потерь для участка теплосети, находящегося в процессе эксплуатации в нестационарном режиме. Предложены критерии задания диспетчером теплосети температуры теплоносителя на источнике теплоты, требуемой для исполнения температурного графика. Полученные результаты также могут быть использованы в организациях, эксплуатирующих тепловые сети централизованного теплоснабжения, для обеспечения регулирования режима работы теплосети при минимуме потерь тепловой энергии. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Характер изменения температуры подаваемого теплоносителя в сеть (интервал задания нового значения и скорости изменения температуры) непосредственно влияет на потери тепловой энергии в окружающую трубопроводы среду, возникающие в результате градиента температур теплоносителя в трубопроводе и окружающей среды. Учитывая то, что значения температур наружного воздуха, теплоносителя, влияющих на режим работы теплосети, постоянно изменяются во времени, процессы теплообмена (теплопередачи) между теплоносителем и окружающей трубопровод средой являются нестационарными. В работе рассмотрены текущие требования нормативно-технических документов касательно задания режима работы теплосети, проанализированы факторы, влияющие на изменение режима теплосети.

Ключевые слова: *теплоснабжение; регулирование подачи теплоты; диспетчер тепловых сетей; потери тепловой энергии; температура теплоносителя.*

Для цитирования: Ахметова И.Г., Лапин К.В. Оптимальная периодичность изменения температуры теплоносителя на источнике теплоты и влияние скорости её изменения на потери тепловой энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 139-149. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-139-149.

OPTIMAL FREQUENCY OF TEMPERATURE CHANGE OF A HEAT TRANSFER AGENT ON A HEAT SOURCE AND THE INFLUENCE OF THE RATE OF CHANGE THEREOF ON HEAT ENERGY LOSS

IG. Akhmetova, KV. Lapin

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0002-7082-2005, irina_akhmetova@mail.ru; lapinky@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In modern realities, the operation of heat networks of the district heating system involves a constant search for ways to minimize heat energy losses. *METHODS.* Therefore, the task of minimizing heat energy losses while controlling the temperature of the supplied heat transfer medium from the sources of heat becomes very important. When operating district heating networks in the Russian Federation, regulation of heat supply to consumers during the heating period is carried out depending on the outside air temperature, as a rule, in two ways: qualitative method by changing the water temperature in the supply main of the heating network; qualitative-quantitative method by changing the temperature and water consumption in the supply main of the heating network. The methods of regulation used are related to the need to maintain a stable hydraulic mode of heat networks. Actions on the regulation of heat supply to consumers are performed at the heat source in accordance with the indication of the heat network dispatcher according to the approved temperature schedule for the heat supply system. *RESULTS.* This paper presents the results of a study of the dependence of changes in the actual heat losses for the section of the heating network, which is during the operation process in a non-stationary mode. Criteria for setting the temperature of the heat carrier at the heat source required to meet the temperature schedule by the heat network dispatcher are proposed. The results obtained can also be used in organizations operating district heating networks to ensure the regulation of the heating network operation mode with minimum heat losses. *CONCLUSION.* The nature of changing the temperature of the supplied coolant in the network (the interval of setting a new value and the rate of temperature change) directly affects the heat energy losses in the surrounding pipeline environment, resulting from the temperature gradient of the coolant in the pipeline and the environment. Given the fact that the values of the temperature of the outside air, heat-carrier, affecting the operating mode of the heating system is constantly changing over time, the processes of heat-exchange (heat transfer) between the coolant and the environment surrounding the pipeline are unsteady. The work reviewed the current requirements of regulatory and technical documents on the setting of the heating network operation mode, analyzed the factors affecting changes in the mode of the heating system.

Keywords: heat supply; heat regulation; heat network dispatcher; heat losses; coolant temperature.

For citation: IG. Akhmetova, KV. Lapin. Optimal frequency of temperature change of a heat transfer agent on a heat source and the influence of the rate of change thereof on heat energy loss. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(3):139-149. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-139-149.

Введение. Литературный обзор

Предусмотренный нормативно-техническими документами [1, 2] режим изменения температуры подаваемой сетевой воды в сети централизованного теплоснабжения из коллекторов источников теплоты в соответствии с заданием диспетчера тепловой сети определен следующим образом:

- температура сетевой воды в подающих трубопроводах изменяется в соответствии с утвержденным для системы теплоснабжения температурным графиком;
- температура сетевой воды должна быть задана по усредненной температуре наружного воздуха за промежутки времени в пределах 12-24 ч (один или два раза в сутки), в зависимости от длины сетей, климатических условий и других факторов.

В соответствии с [1, 2, 3, 6] регулирование температуры воды на выходе из сетевых подогревателей, на выводах тепловой сети, а также на станциях подмешивания, расположенных в тепловой сети, должно быть равномерным со скоростью, не превышающей 30°C в час. Такое ограничение по режиму работы теплофикационной

установки источника обусловлено тем, чтобы исключить возможность значительных тепловых деформаций трубопроводов и рабочих поверхностей теплообменных аппаратов.

Исходя из существующих нормативно-технических требований, задание (изменение) диспетчером тепловой сети температуры теплоносителя не поставлено в зависимость от цели минимизации потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции трубопроводов.

Постановка задачи исследования

Актуальность исследования заключается в рассмотрении вопроса критериев влияния режима изменения температуры сетевой воды на потери тепловой энергии в сетях. В [7] предложена методика плавного регулирования температуры теплоносителя на выходных коллекторах энергоисточников исходя из цели обеспечить отпуск тепловой энергии за период шести суток максимально близкий к величине нормативно-расчетного отпуска, уменьшить частоту и амплитуду колебаний температуры теплоносителя. Практическое использование данной методики для погодных условий г. Санкт-Петербурга в период отопительного сезона предполагает, что расчет температурного режима на последующий период регулирования (продолжительностью 3-е суток) выполняется ежедневно в 13:00 (после получения прогноза Гидрометцентра о погоде на предстоящую неделю). Фактическая корректировка температурного задания выполняется в случае, если результат расчета требует изменения температуры теплоносителя на величину более 2°C.

При этом влияние предложенной методики плавного регулирования температуры теплоносителя на потери тепловой энергии в сетях не рассмотрено.

В [8] рассмотрена проблема выбора оптимальной температуры теплоносителя по критерию минимальных затрат электроэнергии на перекачку теплоносителя и сокращения потерь теплоэнергии при его транспортировке, приходящихся на 1 погонный метр трубопровода теплосети. Автором предложена методика построения температурного графика качественно-количественного способа регулирования температуры теплоносителя, приведены результаты расчета оптимальной температуры для конкретных климатических условий. Режим изменения температуры сетевой воды в соответствии с заданием диспетчера тепловой сети не рассматривался.

Учитывая малую исследованность влияния режима изменения температуры сетевой воды на потери тепловой энергии в сетях, высокую актуальность приобретает вопрос разработки для диспетчерской службы теплосети критериев изменения температуры теплоносителя, позволяющих минимизировать потери тепла через теплоизоляционные конструкции трубопроводов.

Материалы и методы

Согласно [4] средняя суточная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха в городах России находится в пределах 3,8...16,9°C. Разброс средних значений суточной амплитуды характеризуется следующими факторами:

- территориальный (условия различных климатических зон);
- временной, когда суточная амплитуда зависит от времени года. При этом амплитуда изменения температуры наружного воздуха растет с увеличением среднемесячной температуры наружного воздуха.

На протяжении года максимальная суточная амплитуда температуры наружного воздуха выше средней в 2-4 раза. Причем кратность максимальной амплитуды к среднесуточной увеличивается в осенне-зимний период и достигает максимального значения в холодные месяцы.

График суточного хода температуры наружного воздуха имеет вид синусоиды, так как это связано с суточным ходом освещенности Земли (нагревом воздуха и поверхностей солнечной радиацией). В течении суток достигаются значения максимальной (однократно), минимальной (однократно) и средней (двукратно) температуры наружного воздуха.

Например, согласно приведенной в [4] для г. Казани в республике Татарстан суточная амплитуда температуры воздуха составляет (табл. 1):

Таблица 1
Table 1

Суточная амплитуда температуры воздуха.
Daily air temperature amplitude.

январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Средняя суточная амплитуда температуры наружного воздуха, °С											
6,5	7,6	8	8,1	10,7	11,9	11,1	10,8	9,2	6,1	5,2	6,2
Максимальная суточная амплитуда температуры наружного воздуха, °С											
20,4	19,7	19,5	18,7	20,7	21,9	19,1	19,8	21,3	17,3	22,3	26,7
Средняя месячная температура воздуха, °С											
-11,6	-10,9	-4,3	5,3	13,2	17,6	19,7	17,4	11,5	4,2	-3,2	-8,9

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Используя действующий на текущий момент температурный график качественно-количественного регулирования (утвержден 28.06.2021) для системы централизованного теплоснабжения для Казанских ТЭЦ-1,2 (115/70°С), расчетная амплитуда (диапазон) суточного изменения температуры подаваемого теплоносителя в подающем трубопроводе от источника теплоты в зимний период должна составлять (табл. 2):

Таблица 2
Table 2

Расчетная амплитуда (диапазон) суточного изменения температуры подаваемого теплоносителя в подающем трубопроводе от источника теплоты в зимний период
Calculated amplitude (range) of the daily variation of the supply temperature in the supply line from the heat source in winter period

январь	февраль	март	апрель	октябрь	ноябрь	декабрь
при средней амплитуде температуры наружного воздуха, °С						
12,2	14,4	17,8	2,8	2,8	12,1	12,4
при максимальной амплитуде температуры наружного воздуха, °С						
34,8	35,6	34,1	14,1	15,2	34,7	42,8

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Скорость изменения температуры теплоносителя в период осенне-зимнего периода (ноябрь-март) составит порядка 0,50...0,74°С/час для условия соблюдения средней амплитуды и 1,42...1,78°С/час для максимальной амплитуды (при расчете скорости исключены переходные месяцы апрель, октябрь, где амплитуда минимальна). Указанные значения много меньше установленного нормативно-техническими требованиями предела 30°С/час.

Заданное 1-2 раза в сутки диспетчером теплосети значение температуры теплоносителя по усредненной температуре наружного воздуха согласно [1,2] не учитывает амплитуду колебаний температуры воздуха в течение суток (см. табл.1) и вследствие чего не может быть соблюдена необходимая амплитуда (диапазон) изменения температуры подаваемого теплоносителя (см. табл.2).

Это приводит к тому, что в течении суток температура теплоносителя не будет соответствовать температурному графику в большинстве времени, что противоречит нормативному условию изменения температуры сетевой воды в соответствии с утвержденным для системы теплоснабжения температурным графиком.

К тому же, завышенное значение температуры теплоносителя провоцирует возникновение дополнительных тепловых потерь из-за увеличения градиента температуры между теплоносителем и окружающей средой.

Таким образом, в условиях необходимости надлежащего обеспечения тепловой энергией потребителей периодичность задания диспетчером теплосети температуры теплоносителя требуется установить чаще.

Для исключения вышеописанного эффекта несоответствия в течение суток заданной диспетчером теплосети температуры теплоносителя относительно температурного графика в первом приближении периодичность задания необходимо уменьшить до минимума (то есть постоянно).

Между тем, современный уровень систем анализа и прогноза синоптических процессов на основе данных спутниковых и наземных метеостанций, их доступность для использования широким кругом пользователей, позволяют прогнозировать изменение температуры наружного воздуха не чаще, чем каждый час.

Исходя из требования [1,6] по возможному отклонению температуры воды, поступающей в тепловую сеть, от заданного режима на источнике теплоты не более +/- 3% (или 6% по модулю), вычислим среднее значение допускаемого отклонения температуры теплоносителя по формуле:

$$t_{\text{откл}}^{\text{доп}} = 0,06 \cdot t_{\text{прогноз}}^{\text{тн}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{прогноз}}^{\text{тн}}$ - температура теплоносителя по температурному графику при средней температуре наружного воздуха за предстоящий период суток (согласно прогнозу), °С.

Исходя из условия необходимости соблюдения температурного графика периодичность задания температуры теплоносителя в сутки при этом будет равна:

$$П_{\text{сут}} = \frac{t_{\text{тн.амп}}^{\text{прогноз}}}{t_{\text{откл}}^{\text{доп}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{тн.амп}}^{\text{прогноз}}$ - амплитуда суточного изменения температуры подаваемого теплоносителя, соответствующая амплитуде суточного изменения температуры наружного воздуха по данным прогноза на предстоящие сутки, °С.

Объединив формулы (1) и (2), получим:

$$П_{\text{сут}} = \frac{t_{\text{тн.амп}}^{\text{прогноз}}}{0,06 \cdot t_{\text{прогноз}}^{\text{тн}}} \quad (3)$$

На примере г. Казани, рассчитаем оптимальную периодичность задания диспетчером теплосети температуры теплоносителя исходя из средней амплитуды суточного изменения температуры наружного воздуха в марте месяце, который наиболее близко характеризует средние значения температуры наружного воздуха в осенне-зимний период.

Результаты расчета по формулам (1,3) на примере г. Казани: температура подаваемого теплоносителя по температурному графику при средней температуре наружного воздуха за март составляет $t_{\text{прогноз}}^{\text{тн}} = 88^{\circ}\text{C}$, допускаемое отклонение температуры теплоносителя на источнике теплоты составляет $t_{\text{откл}}^{\text{доп}} = 5,28^{\circ}\text{C}$, амплитуда суточного изменения температуры подаваемого теплоносителя соответствующая средней амплитуде суточного изменения температуры наружного воздуха в марте из [9] составляет $t_{\text{тн.амп}}^{\text{прогноз}} = 17,8^{\circ}\text{C}$, периодичность задания температуры теплоносителя в сутки составит $П_{\text{сут}} = 3,37$ (\approx каждые 8 часов суток).

Принимая условие о том, что периодичность задания диспетчером теплосети температуры теплоносителя по г. Казани должна гарантировать исполнение утвержденного для системы теплоснабжения температурного графика, использование значения максимальной амплитуды суточного изменения температуры наружного воздуха для расчета оптимальной периодичности задания температуры теплоносителя по формуле (3) обосновано.

Используя значение максимальной амплитуды суточного изменения температуры наружного воздуха по г. Казани в марте из [9], которое составляет $t_{\text{тн.амп}}^{\text{прогноз}} = 34,1^{\circ}\text{C}$, расчёт

по формуле (3) оптимальной периодичности задания температуры теплоносителя дает $\Pi_{\text{сут}} = 6,46$ (\approx каждые 4 часов суток).

Необходимо отметить то, что тепловая сеть обладает инерционностью - величина времени прохождения теплоносителя по участку тепловой сети от источника до объекта потребителя (время прохождения так называемой «температурной волны»), которая для разветвленных систем централизованного теплоснабжения достигает от нескольких часов до полусуток.

Таким образом, диспетчер теплосети при задании температуры теплоносителя должен в обязательном порядке учитывать инерционность теплосети, а именно среднее время прохождения температурной волны до объектов теплопотребления, чтобы корректно задать требуемую температуру теплоносителя, которая необходима для отопления объектов потребителей согласно прогнозным данным о температуре воздуха.

Результаты и их обсуждение

В [5] приведены результаты исследования проблемы расчета тепловых потерь в нестационарных условиях при постоянно изменяющемся градиенте температур теплоносителя на источнике теплоты и в конце исследуемого участка теплосети (в режиме реального времени), в результате которых получена математическая функция зависимости изменения соотношения фактических и нормативных тепловых потерь для участка теплосети, находящего в процессе эксплуатации.

Результаты исследования показывают то, что при эксплуатации тепловых сетей соотношение фактических и нормативных тепловых потерь для участка тепловой сети изменяется во времени и линейно зависит от скорости изменения температуры теплоносителя.

Аналогичные исследования проведены на участке теплосети в г. Казани от районной котельной «Савиново» до объекта теплопотребления «Многokвартирный дом по ул. Мусина, 53».

Данные о фактической температуре теплоносителя в конце исследуемого участка тепловой сети из системы дистанционного снятия показаний и нормативное значение температуры теплоносителя, рассчитанное по нормам из [10], за промежуток времени с 19.12.2021 по 25.12.2021 (6 суток) показаны на рисунке 1.

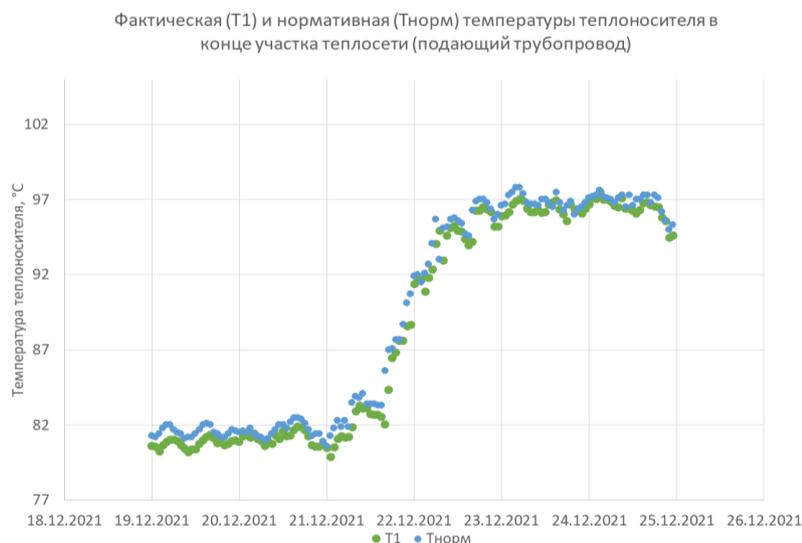


Рис. 1 Данные о фактической температуре теплоносителя в конце исследуемого участка тепловой сети

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Как видно из рис.1, фактическая температура теплоносителя изменялась во времени (ввиду изменения температуры теплоносителя по заданию диспетчера теплосети из-за колебаний температуры наружного воздуха) и была ниже нормативного значения температуры теплоносителя.

Вычисление соотношения фактических и определенных по нормам [10] тепловых потерь для исследуемого участка тепловой сети произведем по формуле:

$$K = \frac{T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} - T_{\tau_k}^{\text{тн.кон}}}{T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} - T_{\text{норм}}^{\text{тн.кон}}} \quad (4)$$

где $T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}}$ - фактическая температура подаваемого теплоносителя от районной котельной «Савиново» по данным системы дистанционного снятия показаний в момент времени τ_0 , °С; $T_{\tau_k}^{\text{тн.кон}}$ - фактическая температура теплоносителя, поступающего в систему теплоснабжения объекта по данным системы дистанционного снятия показаний в момент времени τ_k , °С; $T_{\text{норм}}^{\text{тн.кон}}$ - нормативная температура теплоносителя, поступающего в систему теплоснабжения объекта, °С.

Принимая во внимание то, что система дистанционного снятия показаний фиксирует время каждого измерения, значение фактической температуры теплоносителя в конце участка тепловой сети, полученное в момент времени τ_k , необходимо соотносить с температурой теплоносителя в начале участка тепловой сети в момент времени τ_0 с задержкой на величину времени прохождения теплоносителя по участку тепловой сети от районной котельной «Савиново» до объекта теплоснабжения «Многоквартирный дом по ул. Мусина, 53» (48,2 минут).

Время прохождения температурной волны определено исходя из гидравлического расчета по данным электронной модели Схемы теплоснабжения г. Казани, утвержденной приказом Минэнерго России от 30.12.2021 №1543.

На рисунке 2 представлены графики для исследуемого участка теплосети от районной котельной «Савиново» до объекта теплоснабжения «Многоквартирный дом по ул. Мусина, 53»:

- значений скорости изменения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе теплосети от районной котельной «Савиново» во времени;
- значений соотношения фактических и нормативных (по нормам в [10]) значений потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции, рассчитанных по формуле (4).

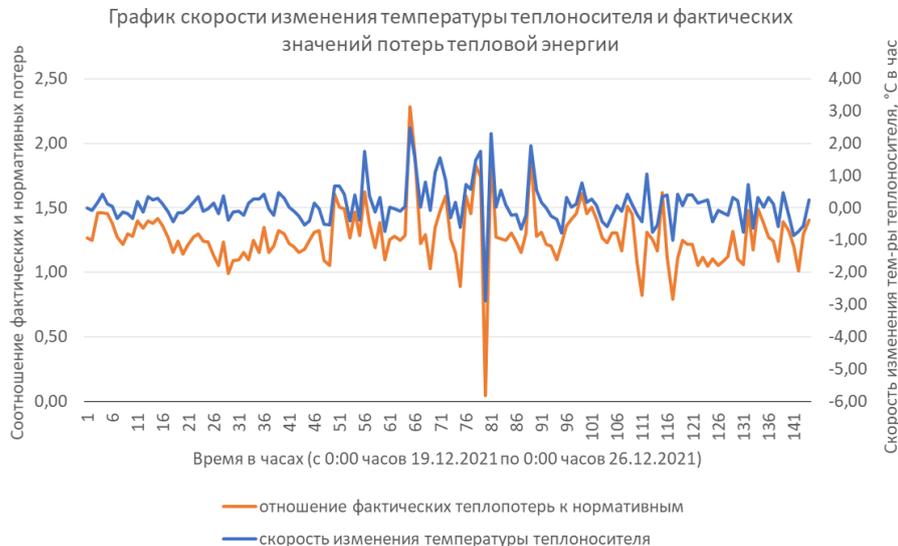


Рис.2 Графики для исследуемого участка теплосети *Fig. 2. Graphs for the investigated heat network section*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Взаимное коллинеарное расположение графиков указывает на их линейную зависимость друг от друга.

Путем аппроксимации данных, представленных на рис.2, по методу наименьших квадратов выполнено построение математической функции зависимости изменения соотношения фактических и нормативных тепловых потерь (коэффициент К) от скорости изменения температуры теплоносителя от районной котельной «Савиново», задаваемой диспетчером теплосети. Полученная функция и ее график представлены на рис.3.



Рис.3. Точки экспериментальных данных для построения графика зависимости

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В результате получена математическая функция линейной регрессии:

$$K = 0,3018 \cdot \Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} + 1,2549 \quad (5)$$

где K - коэффициент (соотношение) фактических и определенных по нормам в [10] тепловых потерь для участка тепловой сети; $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}}$ - скорость изменения температуры теплоносителя (на выводах районной котельной «Савиново»), °С/ч.

Таким образом, полученная линейная зависимость соотношения фактических и нормативных тепловых потерь от скорости изменения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе теплосети от источника до конечного потребителя, полученная с использованием системы дистанционного съема показаний средств измерения температуры теплоносителя, имеет следующий вид:

$$K = f(\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}}) = A \cdot \Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} + B \quad (6)$$

где A - коэффициент, характеризующий влияние теплового состояния многослойной стенки (металл трубопровода, тепловая изоляция, грунт - для сетей подземной прокладки, воздушное пространство канала) на потери тепловой энергии во времени ($A > 0$), ч/°С; B - соотношение фактических и нормативных тепловых потерь для стационарного процесса при отсутствии изменения температуры теплоносителя в начале участка тепловой сети (при $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} = 0$).

Учитывая то, что:

$$K = \frac{Q_i^{\text{ф.п}}}{Q_i^{\text{н.п}}}, \quad (7)$$

где $Q_i^{\text{ф.п}}$ - фактические потери тепловой энергии через тепловую изоляцию i -го участка трубопроводов; $Q_i^{\text{н.п}}$ - нормативные потерь тепловой энергии через тепловую изоляцию i -го участка трубопроводов, формула (6) может быть преобразована к следующему виду:

$$\frac{Q_i^{\text{ф.п}}}{Q_i^{\text{н.п}}} = A \cdot \Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} + B \quad (8)$$

Рассматривая формулу (8), приходим к выводу о том, что в случае повышения температуры теплоносителя в трубопроводах теплосети (при $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} > 0$) фактические потери тепловой энергии увеличиваются за счет усвоения тепловой энергии материалом теплоизоляции, металлом и оболочкой трубопровода, а также окружающей теплосеть

средой. А в случае снижения температуры теплоносителя (при $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} < 0$) фактические потери тепловой энергии уменьшаются за счет отдачи тепловой энергии теплоносителю от материала теплоизоляции и окружающей теплосети среды. При этом ключевую роль играет скорость изменения температуры теплоносителя, которая фактически находится под управлением (влиянием) персонала источника тепловой энергии при выполнении задания диспетчера теплосети.

Исходя из вышеописанной линейной зависимости, в целях минимизации потерь тепловой энергии от трубопроводов теплосети в окружающую среду задание диспетчера теплосети с рассчитанной по формуле (3) периодичностью должно содержать в себе не только значение требуемой температуры теплоносителя согласно утвержденному температурному графику, но и скорость изменения температуры теплоносителя по следующим критериям:

- при необходимости повышения температуры теплоносителя (в случае понижения температуры наружного воздуха) скорость изменения температуры теплоносителя должна быть задана диспетчером теплосети минимальной (в этом случае при $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} > 0, \Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} \rightarrow \min, Q_i^{\phi.n} \rightarrow \min$);

- при необходимости понижения температуры теплоносителя (в случае повышения температуры наружного воздуха) скорость изменения температуры теплоносителя должна быть задана диспетчером теплосети максимальной по модулю (в этом случае при $\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}} < 0, |\Delta T_{\tau_0}^{\text{тн.нач}}| \rightarrow \max, Q_i^{\phi.n} \rightarrow \min$).

Определение действительного значения скорости изменения температуры теплоносителя в зависимости от предложенных критериев должно быть в ведении диспетчера теплосети и зависеть от технического уровня тепломеханического оборудования источника теплоты, способности осуществлять изменение температуры теплоносителя, подаваемого в сеть, и точности работы регулирующего оборудования. Техническая возможность исполнения условий минимума, максимума скорости изменения температуры теплоносителя на источнике теплоты определяется техническими характеристиками регулирующего оборудования, а также регулирующей арматурой.

Выводы

В работе приведены результаты исследования в части разработки для диспетчерской службы теплосети критериев изменения температуры теплоносителя, позволяющих минимизировать потери тепла через теплоизоляционные конструкции трубопроводов.

Исходя из значения максимальной амплитуды суточного изменения температуры наружного воздуха предложена формула расчета оптимальной периодичности задания диспетчером теплосети температуры теплоносителя для обеспечения гарантированного исполнения утвержденного для системы теплоснабжения температурного графика.

Представлен общий вид математической формулы, описывающей зависимость соотношения фактических и нормативных потерь тепловой энергии по участку теплосети от скорости изменения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе теплосети на источнике теплоты.

На основе исследования нестационарного процесса теплопередачи в сетях централизованного теплоснабжения в режиме реального времени обоснована необходимость задания диспетчером теплосети скорости изменения температуры теплоносителя в целях минимизации потерь тепловой энергии от трубопроводов теплосети в окружающую среду.

Разработаны критерии задания диспетчером теплосети скорости изменения температуры теплоносителя, позволяющие получить положительный эффект от влияния теплового состояния многослойной стенки конструкции теплосети на потери тепловой энергии во времени.

Использование в совокупности предложенного способа расчета оптимальной периодичности задания температуры теплоносителя и задание скорости изменения температуры теплоносителя согласно приведенных в работе критериев позволяет организации, эксплуатирующей тепловые сети, обеспечить минимальные значения потерь тепловой энергии.

Литература

1. Приказ Минэнерго России от 24.03.2003 N 115 «Об утверждении Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок» (Зарегистрировано в Минюсте России 02.04.2003 N 4358).
2. Приказ Госстроя РФ от 13.12.2000 N 285 «Об утверждении Типовой инструкции по технической эксплуатации тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения».
3. РД 153-34.0-20.507-98. Типовая инструкция по технической эксплуатации систем транспорта и распределения тепловой энергии (утв. РАО «ЕЭС России» 06.07.1998).

4. СП 131.13330.2018 «СНИП 23-01-99* Строительная климатология» (утв. приказом Минстроя России N 763/пр от 28.11.2018).
5. Ахметова И.Г., Лапин К.В. Исследование нестационарных процессов теплообмена в тепловых сетях централизованного теплоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 13-26.
6. Приказ Минэнерго России от 19.06.2003 N 229 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте России 20.06.2003 N 4799).
7. Рожков Р.Ю. Методика плавного регулирования температуры теплоносителя на выходных коллекторах энергоисточников. Журнал «Новости теплоснабжения» N 02 (150) 2013 г.
8. Панферов В.И., Гавей О.Ф. Об оптимальном управлении температурой теплоносителя в тепловых сетях. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. N 4. Т. 14. 2014 г.
9. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНИП 23-01-99* (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 275) (ред. от 17.11.2015).
10. Приказ Минэнерго России от 30.12.2008 N 325 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя».
11. Горин Ю.А., Анисимов П.Н. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики // Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП. Т. 24, № 3 (2022) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111>.
12. Халлыев И., Гильфанов К.Х. Снижение стоимости теплонасосной системы теплоснабжения путем замены коллектора первого контура. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики // 2020. Т. 22. № 1. С. 28-37. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-28-37>.
13. Гильфанов К.Х., Якимов Н.Д., Минвалеев Н.Ю., и др. Нестационарные трение и теплообмен в начальном участке трубопровода при сбросе тепловой нагрузки. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики // 2018. Т.20. № 5-6. С.22-28. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-22-28>.
14. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А., и др. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений. Вестник ЧувГУ. 2017. №1.С 20-28.
15. Паулаускайте Сабина, Валанчюс Кястутис. Материалы Международной нацнотехнической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», 23 – 25 ноября 2021, МГСУ.
16. Matthias Finkenrath, Till Faber, Fabian Behrens, Stefan Leiprecht. Holistic modelling and optimisation of thermal load forecasting, heat generation and plant dispatch for a district heating network. V.250, 1 July 2022, 23666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123666>.
17. Hjörleifur G. Bergsteinsson, Phillip B. Vette, Jan Kloppenborg Møller, Henrik Madsen. Energy Conversion and Management. Estimating temperatures in a district heating © Ахметова И.Г., Лапин К.В. 21 network using smart meter data. V. 269, 1 October 2021, 116113. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116113>.
18. Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Разработка модели для анализа способов снижения несимметрии напряжений в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. №2. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>.
19. Sophie Knöttner, b Benedikt Leitne, René Hofmann. Impact of recent district heating developments and low-temperature excess heat integration on design of industrial energy systems: An integrated assessment method. Energy Conversion and Management. Volume 263 , 1 July 2022 , 115612. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115612>

Авторы публикации

Ахметова Ирина Гареевна – д-р. техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям, Казанский государственный энергетический университет.

Лапин Константин Викторович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет, начальник отдела реализации, балансов и анализа потерь тепловой энергии АО «Татэнерго».

References

1. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 24.03.2003 N 115 «On Approval of the Rules for Technical Operation of Thermal Power Units» (registered with the Ministry of Justice of Russia on 02.04.2003 N 4358).
2. Gosstroy RF order from 13.12.2000 N 285 «On Approval of the standard instruction for the technical operation of heating networks of public district heating systems».
3. RD 153-34.0-20.507-98. Standard instruction for technical operation of heat transport and distribution systems (approved by RAO «UES of Russia»06.07.1998).
4. SP 131.13330.2018 «SNIP 23-01-99* Construction Climatology» (approved by Order of the Ministry of Construction of Russia N 763/pr of 28.11.2018).

5. Akhmetova IG, Lapin KV. Investigation of non-stationary heat exchange processes in thermal networks of centralized heat supply. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2022;14(3(55)):13-26.
6. Order of the Ministry of Energy of Russia N 229 dated 19.06.2003 «On Approval of the Rules for Technical Operation of Electrical Power Plants and Networks of the Russian Federation» (registered with the Ministry of Justice of Russia on 20.06.2003, N 4799).
7. Rozhkov R.Y. Methodology of Smooth Regulation of Heat Carrier Temperature at the Output Collectors of Energy Sources. *Journal «Heat Supply News»* N 02 (150) 2013.
8. Panferov VI., Gavey OF. *On Optimal Management of the Heat Carrier Temperature in Heat Networks*. *Vestnik of South Ural State University*. Series: Computer Technologies, Control, Radioelectronics. 2014;4:14.
9. SP 131.13330.2012. *Code of practice. Building Climatology*. Revised edition of SNiP 23-01-99* (approved by Order No. 275 of the Ministry of Regional Development of Russia dated 30.06.2012) (as amended on 17.11.2015).
10. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 30.12.2008 N 325 «On Approval of the Procedure of Determination of Technological Losses during Heat and Heat Carrier Transmission».
11. Gorinov YA, Anisimov PN. Proceedings of Higher Educational Institutions. *Problems of power engineering. Raising the efficiency of centralized heat supply systems by means of the modernization of IHS*. T. 24, ISSUE 3 (2022) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111>.
12. Khallyev I, Gilfanov KKh. Decrease in cost of the heat-pumping system by means of replacement of a collector of the first contour. *Izvestia of higher educational institutions. Problems of power engineering*. 2020;22(1):28-37. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-28-37>.
13. Gilfanov KH, Yakimov ND, Minvaleev NY, et al. *Non-stationary friction and heat exchange in initial section of pipeline at discharge of heat load*. Proceedings of higher educational institutions. Problems of Power Engineering. 2018. T.20. № 5-6. C.22-28. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-22-28>.
14. Afanas'ev VV, Kovalev VG, Tarasov VA, et al. Investigation of the non-stationary heat regimes of the heating of buildings and structures. *ChuvSU Vestnik*. 2017;1:20-28.
15. Paulauskaite Sabina, Valancius Kęstutis. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Theoretical Foundations of Heat and Gas Supply and Ventilation», 23 - 25 November 2021, MSCU.
16. Matthias Finkenrath, Till Faber, Fabian Behrens, et al. Holistic modelling and optimisation of thermal load forecasting, heat generation and plant dispatch for a district heating network. 2022;250:2366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123666>.
17. Hjörleifur G. Bergsteinsson, Phillip B. Vette, Jan Kloppenborg Møller, Henrik Madsen. Energy Conversion and Management. Estimating temperatures in a district heating system. Akhmetova IG, Lapin KV. 21 network using smart meter data. V. 269, 1 October 2021, 116113. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116113>.
18. Biriulin VI, Kudelina DV. Model development for the analysis of methods of voltage unsymmetry decrease in the power supply system). *Izvestia of higher educational institutions. Problems of power engineering*. 2022;24:2. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86>.
19. Sophie Knöttner, b Benedikt Leitne, René Hofmann. Impact of recent district heating developments and low-temperature excess heat integration on design of industrial energy systems: An integrated assessment method. *Energy Conversion and Management*. 2022;263:115612. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115612>

Authors of the publication

Irina G. Akhmetova – Vice-Rector for Development and Innovation, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Konstantin V. Lapin – Postgraduate student, Kazan State Power Engineering University, Head of the Department of Sales, Balances and Analysis of Thermal Energy Losses of JSC Tatenergo, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 15.06.2023 г.

Отредактировано 20.06.2023 г.

Принято 06.07.2023 г.



ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ БИОРЕСУРСОВ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
kalayda4@mail.ru

Резюме. Актуальность определяется необходимостью решения экологических задач при эксплуатации водохранилищ. Куйбышевское водохранилище функционирует с 1957 года и в последний период происходят значимые изменения в температурном и гидрологическом режиме, что отражается на качественном и количественном составе ихтиофауны. Управление водными биоресурсами необходимо для улучшения экологической ситуации и продовольственной безопасности региона

ЦЕЛЬ. Рассмотреть видовой состав уловов, количественную представленность рыб в фактическом вылове в условиях современного уровневого и температурного режимов на участках Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан; выявить основные тенденции изменений качественного и количественного состава ихтиофауны для определения путей сохранения и улучшения качества водных биологических ресурсов. **МЕТОДЫ.** Проведен сравнительный анализ собственных исследований и литературных данных по рыбохозяйственным характеристикам Куйбышевского водохранилища, рыбопродуктивности и состояния ихтиофауны. В работе для анализа современного состояния видового состава уловов и представленности рыб в фактическом вылове использованы данные, предоставленные Государственным комитетом Республики Татарстан по биологическим ресурсам. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассмотрены качественный и количественный состав водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища в современных условиях изменения климатических характеристик и гидрологического режима. Особое внимание уделено состоянию ихтиоценозов Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан. Проведен анализ динамики изменения уловов рыбы в р.Волга и Куйбышевском водохранилище. Показано, что основу промысла формируют лещ, густера, синец, плотва и судак. Синец, густера и лещ вместе практически определяют около 65% вылова. В этих условиях с позиций улучшения состава ихтиофауны и ее направленного формирования значительно возрастает роль таких активных хищников, как судак и берш. Рассмотрены особенности динамики уловов судака и берша. Показано, что увеличение доли в уловах судака и берша связано с улучшением их кормовой базы – с ростом численности сорной рыбы, среди которой важное значение, как кормовой компонент, имеет тюлька. Сделан вывод о том, что отсутствие значительного вылова тюльки способствует росту численности и, соответственно, уловов берша и судака. Отмечено, что сбросы воды из водохранилища не отражаются существенным образом на запасах судака и берша,

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенная оценка рыбопродуктивности Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан во временном аспекте и по рыбопромысловым участкам показала, что на всех рыбопромысловых участках Куйбышевского водохранилища рыбопродуктивность в последние годы возрастает. Самая высокая рыбопродуктивность по результатам фактического вылова рыбы отмечается на Тетюшском и Спасском участках. Средняя за последние годы рыбопродуктивность составила на Тетюшском и Спасском участках – 31,53 кг/га, Камско-Устьинском – 11,89 кг/га, Лаишевском и Алексеевском – 8,11 кг/га, Рыбно-Слободском – 7,19 кг/га, Мамадышском и Елабужском участках – 18,15 кг/га. Сделан вывод, о том, что отмечающийся процесс ускорения эвтрофирования Куйбышевского водохранилища в условиях изменения внешних климатических условий и современного гидрологического режима приводит не только к «цветению» воды, но и к увеличению степени трофии (в пределах мезотрофного класса качества вод).

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище; водные биоресурсы; ихтиофауна; вылов; ценные виды рыб; рыбопродуктивность; эвтрофирование.

Для цитирования: Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Особенности изменений водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища в современных климатических и гидрологических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С.150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.

FEATURES OF CHANGES IN WATER BIORESOURCES OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR UNDER MODERN CLIMATIC AND HYDROLOGICAL CONDITIONS

Kalaida M.L., Sharafutdinov R.G.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

kalayda4@mail.ru

Abstract. The relevance is determined by the need to solve environmental problems in the operation of reservoirs. The Kuibyshev Reservoir has been functioning since 1957 and in the recent period there have been significant changes in the temperature and hydrological regime, which is reflected in the qualitative and quantitative composition of the ichthyofauna. Management of aquatic bioresources is necessary to improve the ecological situation and food security of the region.

THE PURPOSE. Consider the species composition of catches, the quantitative representation of fish in the actual catch under the conditions of the current level and temperature regimes in the areas of the Kuibyshev reservoir within the Republic of Tatarstan; identify the main trends in changes in the qualitative and quantitative composition of the ichthyofauna to determine ways to preserve and improve the quality of aquatic biological resources. **METHODS.** A comparative analysis of our own research and literature data on the fishery characteristics of the Kuibyshev reservoir, fish productivity and the state of the ichthyofauna was carried out. In this work, to analyze the current state of the species composition of catches and the representation of fish in the actual catch, we used data provided by the State Committee of the Republic of Tatarstan on Biological Resources. **RESULTS.** The qualitative and quantitative composition of aquatic bioresources of the Kuibyshev reservoir under modern conditions of changing climatic characteristics and hydrological regime are considered. Particular attention is paid to the state of ichthyocenoses of the Kuibyshev reservoir within the Republic of Tatarstan. An analysis of the dynamics of changes in fish catches in the Volga River and the Kuibyshev reservoir was carried out. It is shown that the basis of the fishery is formed by bream, silver bream, blue bream, roach and pike perch. Blue bream, silver bream and bream together practically determine about 65% of the catch. Under these conditions, from the standpoint of improving the composition of the ichthyofauna and its directed formation, the role of such active predators as zander and bersh increases significantly. The features of the dynamics of catches of zander and bersh are considered. It is shown that the increase in the share of zander and bersh in catches is associated with an improvement in their food supply - with an increase in the number of weedy fish, among which sprat is important as a food component. It is concluded that the absence of a significant catch of sprat contributes to the growth in the number and, accordingly, the catches of bersh and pike perch. It is noted that water discharges from the reservoir do not significantly affect the stocks of pike perch. **CONCLUSION.** The assessment of the fish productivity of the Kuibyshev Reservoir within the Republic of Tatarstan in the temporal aspect and for fishing areas showed that in all fishing areas of the Kuibyshev Reservoir, fish productivity has been increasing in recent years. The highest fish productivity according to the results of the actual fish catch is noted in the Tetyushsky and Spassky areas. The average fish productivity in recent years was 31.53 kg/ha in Tetyushsky and Spassky plots, 11.89 kg/ha in Kamsko-Ustyinsky, 8.11 kg/ha in Laishevsky and Alekseevsky, 7.19 kg in Rybno-Slobodsky, ha, Mamadyshsky and Yelabuga plots - 18.15 kg / ha. It is concluded that the observed process of accelerating the eutrophication of the Kuibyshev reservoir under conditions of changing external climatic conditions and the current hydrological regime leads not only to the "blooming" of water, but also to an increase in the degree of trophy (within the mesotrophic class of water quality).

Keywords: Kuibyshev reservoir; aquatic bioresources; ichthyofauna; catch; valuable fish species; fish productivity; eutrophication.

For citation: Kalaida ML, Sharafutdinov RG. Features of changes in water bioresources of the kuybyshev reservoir under modern climatic and hydrological conditions. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(3):150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.

Введение

В [1] показаны особенности современного состояния гидрологического режима Куйбышевского водохранилища за последний период, влияющего на состояние ихтиоценоза. Это такие характеристики, как максимальные, минимальные и средние уровни воды в Куйбышевском водохранилище. За последний период средний уровень колебался от 50,34 до 52,31 м при НПУ – 53,00 м БС, УМО – 45,5 м. Анализ данных по средним уровням в Куйбышевском водохранилище наглядно показывает маловодные годы – 2010, 2011, 2017 и 2021 и многоводные – 2013 - 2016, 2018 и 2020. Минимальные уровни в Куйбышевском водохранилище отмечались с марта по май. Среднегодовое значение водности года характеризуется приходом 254 км³ воды. В последний период приходы 240 км³/год и менее, характерные для маловодных лет отмечались в 2009, 2010, 2011, 2014, 2015, 2021 гг. Приходы 311 км³/год и более, характерные для многоводных лет не были отмечены. Остальные годы (2007, 2008, 2012, 2013, 2016-2020) характеризуются средней водностью.

Проведенный анализ динамики изменения максимальных и минимальных уровней воды в Куйбышевском водохранилище на современном этапе выявил следующие происходящие изменения:

- минимальный зафиксированный уровень воды (48,16 м) отмечен в январе (2011г.), в конце XX столетия минимальные уровни фиксировались в марте - апреле и они были ниже на 1-1,5 м при летней сработке и на 2,5 – 3,5 м в зимний период;
- подъем уровня приходится на апрель, в то время как раньше он приходился на май. Продолжительность периода высокой воды (около 53 м) увеличилась до 4 мес;
- максимальные уровни воды – около 53 м – отмечаются чаще, высокие уровни воды стали отмечаться и во второй половине лета и осенью;
- в январе и феврале отмечались низкие уровни, которые не фиксировались в предыдущие периоды;
- в декабре уровни воды отмечаются около 50 м, в то время как ранее уровень наиболее часто был выше 51 м.

Анализ гидрологических характеристик показывает, что в совокупности сбросы воды и изменения уровня режима водохранилища характеризуются межгодовыми и внутригодовыми колебаниями, которые отражаются на режиме воспроизводства рыб в Куйбышевском водохранилище. Наиболее уязвимыми видами рыб являются фитофилы, для которых характерно использование для нереста мелководий с растительной компонентой. Проведение сбросов воды после нереста приводит к гибели икры на осушенных прибрежных участках. Для эффективного нереста фитофилов необходимо сочетание таких факторов среды как устойчивость уровня режима и соответствующая температура воды.

Проведенный анализ изменения температур в рассматриваемый период [1] показал, что количество дней с температурой воздуха выше 15°C, характеризующей рыбоводную зону, варьирует в разные годы последнего периода от 71 дня (2017 г.) до 133 дней (2020 г.). Сравнивая количество дней с температурой воздуха выше 15°C в 2001-2011 гг. с современной ситуацией, обращает на себя внимание не только потепление по сравнению с периодом 80-90-х лет XX столетия, но и относительное снижение температур в настоящее время по сравнению с началом XX столетия.

В пресноводной аквакультуре России к настоящему времени сложились и развиваются два основных направления – пастбищное и товарное.

Применение методов пастбищной аквакультуры позволяет рационально использовать производственный потенциал водохранилищ. Направленное формирование ихтиоценоза позволяет получать дополнительную высококачественную рыбную продукцию за счет более полного освоения трофического потенциала и способствует восстановлению ценной аборигенной ихтиофауны.

Развитие пастбищной аквакультуры на базе Куйбышевского водохранилища является одним из не только приоритетных, но и необходимых направлений, в связи с тем, что в результате стихийного формирования ихтиофауны наблюдается увеличение в уловах доли малоценных и сорных видов [2].

Исторически ихтиофауна Куйбышевского водохранилища базируется на видовом составе рыб р.Волга.

Начало ихтиологическим исследованиям Средней Волги положили работы Ковалевского А.О. по искусственному оплодотворению стерляди в 1868 г. [3]. Эти работы послужили основой В.В. Зеленскому для изучения эмбриологии этого вида в 1878 г. Ихтиологические исследования и подготовка кадров ихтиологов были начаты А. А. Остроумовым, среди воспитанников которого – В.И. Мейснер – первый нарком рыбной промышленности. Таким образом, главными объектами наблюдений за рыбами Средней Волги были осетровые, среди которых туводной стерляди уделялось особое внимание. Стерлядь (*Acipenser ruthenus* L.) является одним из наиболее ценных представителей местной ихтиофауны. В регионе Среднего Поволжья она всегда привлекала внимание как представитель осетровых, не совершающий больших миграций. Еще в период с 1910 по 1917 год проводились работы по изучению вопросов воспроизводства стерляди. Уже тогда отмечалось, что «непомерный вылов стерляди, несоответствие сроков запрета периоду икрометания и вообще недостаточность ее охраны даже в благоприятных участках для ее жизни приводят к постепенному упадку стерляжьего промысла» [4].

Проведенные специальные исследования биологии стерляди показали, что «стерлядь - один из наиболее устойчивых, не склонных к исчезновению видов рыб и лишь только крайне настойчивое и продолжительное преследование ее человеком может истребить ее в том или ином участке реки». Окончательному истреблению стерляди препятствовали, по мнению В. Клера [4], особенности ее нереста и несовершенство лова. Среди особенностей нереста стерляди В. Клер отмечает главную: она мечет икру не на больших нерестилищах, где собирается в стада, а всюду, где есть соответствующие участки грунта и подходящие условия. В. Клер писал, что «стерляжья кампания 1916 годов, когда были организованы очень многочисленные наблюдательные пункты в Казанском районе, особенно наглядно доказала, что самки стерляди мечут икру в одиночку и особых нерестилищ не существует».

Из проходных рыб в Куйбышевском водохранилище в начальный период его существования остались только русский осетр и белуга, которые в момент образования водохранилища (1957 г.) находились выше плотины [5] (Лукин, Сильченко, 1985). Около 1000 разновозрастных русских осетров было также завезено из Астрахани и выпущено в водохранилище [6]. После 1957 года молодь белуги до 1963 г. в уловах не встречалась, а летом 1963 г. появилась в довольно большом количестве [7]. По мнению А.В. Лукина [6], в 1963 г. произошел повторный нерест рыб, задержанных в водохранилище при перекрытии Волги плотиной. К осени молодь белуги скатилась в море, и после 1964 г. она перестала попадаться в уловах до 1977 г. Летом 1977 г. в районе Тетюш вновь стала попадаться молодь белуги. В тех местах, где ловилась молодь, до образования водохранилища было нерестилище, на котором размножались стерлядь, белуга и осетр [8,9]. Проведенный морфологический анализ ловившихся экземпляров позволил А.В. Лукину [5] выдвинуть предположение о появлении в водохранилище гибридов стерляди с белугой и стерляди с осетром, которые существенно различались по ряду признаков. По его мнению, это могло отразиться на формировании запасов стерляди в водохранилище и на ее морфологии. Последняя крупная белуга - самец весом 207 кг - была поймана в устье Камы в феврале 1983г. [5].

С одной стороны, значение стерляди в составе ихтиофауны возросло в связи с зарегулированием стока р. Волги и исчезновением других представителей осетровых, с другой стороны, стерлядь - типичный реофил, и ее популяция претерпела существенные изменения в условиях водохранилища. Популяция стерляди Куйбышевского водохранилища сформировалась на основе стада средневожской стерляди. С момента образования водохранилища и становления его экосистемы произошли существенные изменения в ряде биологических особенностей стерляди. Она является достаточно хорошо изученным объектом местной ихтиофауны. По мере освоения новых условий обитания, скорость роста стерляди увеличилась. Если в период с 1956 по 1960 годы стерляди десятилетнего возраста имели длину около 35 см [10, 11, 12], то к началу 80-х годов они имели длину около 55 см. Изучение роста стерляди показало, что 78,3% самок в контрольных уловах имели абсолютную длину от 45 до 65 см. Самки встречались от 1 до 21 года, большинство особей имели возраст от 3 до 13 лет. Однако, несмотря на увеличение скорости роста стерляди, стало отмечаться ее более позднее половое созревание при больших размерах: самые

младшие самки, готовые принять участие в нересте и находившиеся на IV стадии зрелости гонад, имели возраст 9 лет при длине 48-51 см. Большинство половозрелых самок (86,3%) имели возраст 11 лет. Встречались в уловах неполовозрелые самки, находящиеся на II и III-жировой стадиях половой зрелости в возрасте 13 лет.

В конце XX столетия ихтиологи считали исчезновение стерляди из-за оценок состояния ее гонад при снижении скоростей течения в весенний период вероятным в короткий промежуток времени [13]. Этому мнению способствовало и ее сокращение в уловах (рис.1) [14]. Запасы стерляди всегда были невелики [14]. В 80-90-е годы XX столетия произошло значительное сокращение уловов стерляди в пределах республики с 141 т (70-е годы) до 5-10 т в начале XXI столетия.

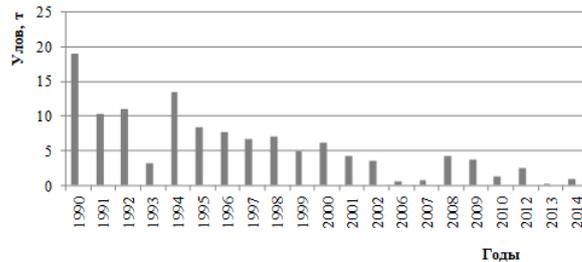


Рис. 1. Динамика уловов стерляди в Республике Татарстан по данным официальной статистики *Fig.1. Dynamics of sterlet catches in the Republic of Tatarstan according to official statistics*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

В настоящее время стерлядь относится к редким видам и занесена в Красные книги ряда субъектов Российской Федерации:

- Красная книга Российской Федерации (популяции верхней и средней Камы, Суры) /источник информации: <http://biodat.ru/db/rb/rb.php?src=1&vid=167/>.

- Красная книга Башкортостана (источник информации: <http://www.redbook.ru/article88.html>);

- Красная книга Чувашской Республики (источник информации: <http://enc.cap.ru/?t=publ&hry=159&lnk=4171>);

- Красная книга Марий Эл (источник информации: http://www.gov.mari.ru/debzn/ekolog/ekol-post_pravit75.doc);

- Красная книга Ульяновской области (источник информации: <http://redbook73.ru/docs/02-3-3-003.php>);

- Красная книга Нижегородской области (источник информации: <http://red-book-nn.ru/docs/02-3-02-001.htm>);

- Красная книга Кировской области (источник информации: <http://hibio.narod.ru/redbook/fishes.html#1>);

- Красная книга Оренбургской области (источник информации: http://www.orenobl.ru/priroda/kr_kn.php);

Вид охраняется во всех пограничных с Республикой Татарстан субъектах Российской Федерации, а популяции стерляди выше по течению р. Камы и в р. Сура имеют наивысший государственный статус охраны – занесены в Красную книгу России. Поскольку и в конце XX столетия и в настоящий период отмечается ежегодное появление молоди стерляди в Камском плесе, в Республике Татарстан в 2017 году создан Государственный природный зоологический заказник регионального значения «Нерестилище стерляди» (рис.2) общей площадью 1750 га.



Рис. 2 Государственный природный зоологический заказник регионального значения «Нерестилище стерляди». *Fig.2 State natural zoological reserve of regional significance "Spawning ground for sterlet".*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Уловы в реке Волга до зарегулирования колебались от 1350 до 1910 тонн [7]. Максимальные уловы в водоемах Татарстана до образования Куйбышевского водохранилища приходятся на начало 30-х годов XX столетия – 2020 (1932 г.) – 2300 тонн (1933 г.). В 1950-е годы при организации Куйбышевского водохранилища планировались уловы рыбы в объеме 20-24 тыс. тонн, основу которых должны формировать лещ (35%), сазан (15%), судак (10%), щука (8%) и осетровые (2%) [7]. Остальные виды должны были составлять 30%.

Промысловый лов рыбы в Куйбышевском водохранилище берет начало с 1961 г. До этого был период запрещения вылова для наращивания стада рыб. Первые максимальные фактические уловы были отмечены в 1963- 1966 годах – 2,5 – 3,2 тыс.т. Особенно высокой в уловах была доля щуки – в 1963 г. ее выловили около 600 т в Республике Татарстан и 1400 т в целом по водохранилищу [2, 3]. К 70-м годам XX столетия были сделаны выводы о том, что лещ, судак смогли адаптироваться к водохранилищным условиям и способны обеспечить пополнение стада рыб за счет естественного воспроизводства. А такие виды как щука и синец, из-за недостатка мест для откладывания икры не смогут поддерживать численность на высоком уровне [3]. С 1970 –х по 1990-е годы уловы в Республике Татарстан колебались около 2000 тонн в год [1, 4]. Снижались уловы судака и щуки. Мелкий частик (синец, густера, плотва, чехонь, берш) по видам промыслом не учитывался.

В 2000-х годах была отмечена тенденция изменения структуры стада рыб в Куйбышевском водохранилище: увеличилась доля малоценных и сорных видов рыб и сокращалась доля ценных промысловых видов [1]. На рисунках 3 и 4 представлена динамика уловов в Куйбышевском водохранилище.

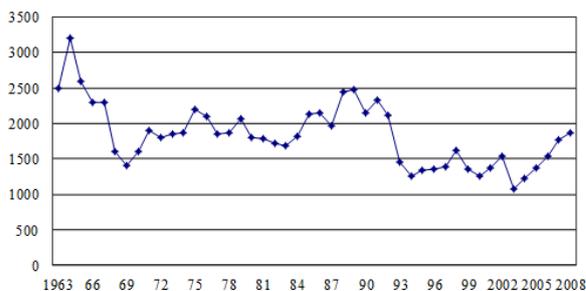


Рис. 3. Фактические уловы рыбы в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан с начала лова до 2008 г.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author



Рис. 4. Фактические уловы в Куйбышевском водохранилище в отдельные годы

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

На рисунках 5 и 6 показано соотношение фактических уловов в Куйбышевском водохранилище по регионам в 2014 г. и 2017 г. Как видно из приведенных на рис. 5 и 6 данных Республика Татарстан добывает более 50% водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища. В связи с этим анализ данных по выловам в Республике Татарстан отражает основные изменения в составе и структуре ихтиофауны водохранилища.

В начальный период существования водохранилища добыча рыбы снижалась. В 1989 г. вылов по Куйбышевскому водохранилищу в целом составил 5981,1 т. в 1994 г. – 2619,7 т, в 2005 г. – 2114,2 т. Только с 2006 года началось постепенное увеличение добычи

рыбы: в 2007 г. – 2863,2 т, в 2008 году вылов достиг 3140,2 т, а в 2009 г. несколько снизился снова – 2891,8 т.

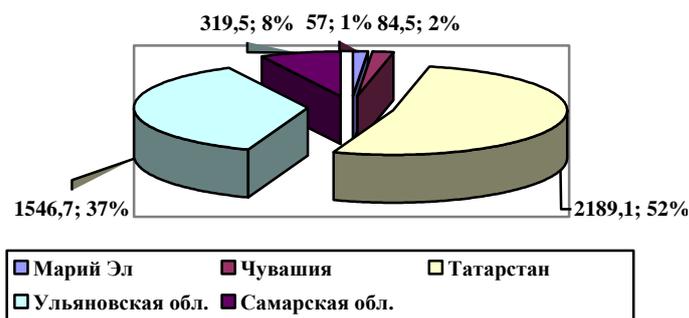


Рис. 5. Соотношение фактических уловов в Куйбышевском водохранилище по регионам в 2014 г. Fig.5.The ratio of factual catches in the Kuibyshev reservoir by region in 2014

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

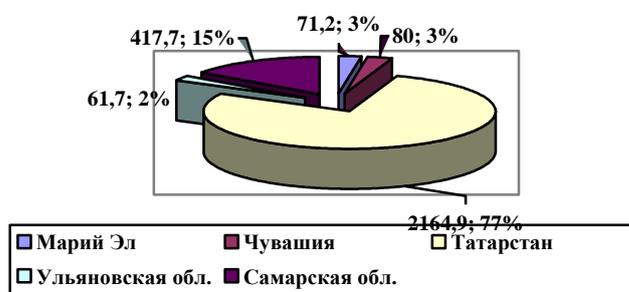


Рис. 6. Соотношение фактических уловов в Куйбышевском водохранилище по регионам в 2017 г. Fig.6.The ratio of actual catches in the Kuibyshev reservoir by region in 2017.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Научная значимость исследования заключается в выявлении закономерностей в формировании качественного и количественного состава водных биоресурсов, что имеет высокую **практическую значимость** при организации промышленного лова рыбы, ведения Красной книги, определения возможности и необходимости лова конкретных видов рыб

Цель данного исследования – рассмотреть качественный и количественный состав водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан по показателям фактического вылова рыбы рыбодобывающими организациями; выявить основные тенденции изменения структуры стада рыб в связи с современными особенностями уровня изменения климата для управления водными биологическими ресурсами: сохранением и увеличением стада ценных видов и использованием малоценных и сорных видов для решения проблем экологической и продовольственной безопасности.

Материал и методика исследования

В ходе работы был проведен анализ собственных исследований и литературных данных по гидрологическим характеристикам Куйбышевского водохранилища, температурному режиму региона и состоянию ихтиофауны. В работе для анализа современного состояния ресурсной части стада рыб использованы данные по вылову рыбы рыбодобывающими организациями, предоставленные Государственным комитетом Республики Татарстан по биологическим ресурсам.

Результаты исследования и их обсуждение

В Республике Татарстан к 2008 г (рис.3) уловы составляли около 2000 т, то в последние годы (рис.7) они около 3500 т.

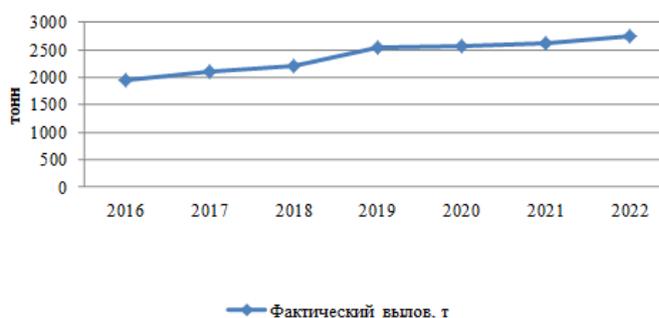


Рис. 7. Фактические уловы рыбы в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан в период с 2016 г. по настоящее время

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Таким образом, с начала XXI столетия отмечается постепенное увеличение фактического вылова рыбы.

Чтобы разобраться за счет, каких видов рыб идет увеличение уловов, на рис. 8 представлены данные по соотношению (%) рыб в фактических уловах в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан во временном аспекте с шагом в 10 лет: в 1998 г, 2008 г. и в 2018 г.

Основу промысла формируют лещ, густера, синец, плотва и судак (рис.2). Вспомним, что при строительстве водохранилища планировалось, что основу вылова обеспечат лещ (35%), сазан (15%), судак (10%), щука (8%) и осетровые (2%). Как видно из приведенных данных на рис. 5 доля леща варьирует около 31-34% и он занимает первое место в уловах за весь период. Сазана в фактическом вылове очень мало: вместо 15% - около 2%. Можно посмотреть, связана ли низкая доля в уловах с браконьерским выловом сазана. В [15] приводятся данные по составу уловов рыбаков – любителей и рыбаков - браконьеров на разных участках Куйбышевского водохранилища в Республике Татарстан. Основные виды в уловах рыбаков из карповых рыб – лещ, плотва и синец. В уловах рыбаков на р.Каме и в Камском плесе водохранилища встречались лещ (10%), сазан (7%), плотва (6%), синец (5%), жерех (5%), чехонь (4%) и карась серебряный (3%). В Мешинском заливе и устье р.Меши ловятся лещ (12%), плотва (12%), сазан (7%), синец (6%), чехонь (6%), карась серебряный (6%) и жерех (3%). В р.Свияге и Свияжском заливе водохранилища ловятся лещ (10%), сазан (8%), синец (8%), чехонь (6%), плотва (6%), карась серебряный (5%) и жерех (5%), густера (1%). В устье р.Казанка ловятся плотва (15%), лещ (12%), синец (10%), чехонь (8%), карась серебряный (3%), жерех (2%), густера (2%), язь (2%), сазан (2%), укляя (2%), карась золотой (1%). По результатам опроса выявились и основные места вылова сазана – это район Волги напротив устья Свияги (Васильево-Займище) и устье Меши - устье Камы (Атабаево). За одну рыбалку в марте на этих участках вылавливалось до 300 кг сазана средней штучной массой около 3 кг. Необходимо отметить, что в районе этих участков рыбхозами проводились выпуски сазана. Таким образом, малая доля сазана в фактическом вылове рыбы не связана с браконьерским выловом этой ценной рыбы.

Синец, густера и лещ вместе практически определяют около 65% вылова. Ежегодный вылов синца в 90-е годы XX столетия варьировал от 305 до 396 т, достигнув к 2009 г. - 440 т и в 2022 г. - 451,5 т. Интересно отметить, что доля синца, густеры и леща этих рыб постепенно снижается. В то время как судак в последнее десятилетие увеличил долю в уловах с 5% до 9%.

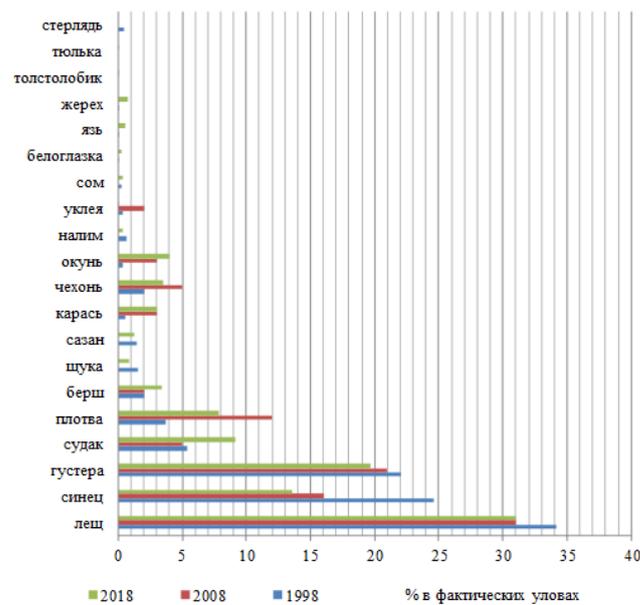


Рис. 8. Соотношение (%) рыб в фактических уловах в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Обыкновенный судак (*Stizostedion lucioperca* L.) является широко распространенным видом в Средней и Восточной Европе. Судак встречается в реках и озерах бассейна Балтийского, Черного, Каспийского и Аральского морей [16]. Он обитает как в пресных, так и в солоноватых водах, образует полупроходные формы. В последние годы ареал распространения судака быстро расширяется за счет его акклиматизации и использования как перспективного объекта аквакультуры как в России, так и в Европе [17; 18; 19]. В Европе в реках Рейн и Дунай судак является объектом спортивного рыболовства. Его максимальная длина достигает 130 см при массе 12 кг [19]. Широкое распространение судак получил и в связи с гидростроительством. Он был вселен в Новосибирское водохранилище, из которого спустился вниз по Оби до Обской и Тазовской губ [16].

Судак занимал второе место в промысле ценных видов в Куйбышевском водохранилище до 80-лет XX века. Его добыча в 80-х годах находилась на уровне 247 тонн в год. Тенденция падения уловов судака наметилась с начала 90-х годов XX столетия. В 2000-х годах его вылов составлял около 84 т в год (5,9% от общего улова). В 2002 г. его выловили 42,9 т (3,1%). С 2004 года общий вылов судака в водохранилище увеличился с 92 до 172 т. Необходимо отметить, что снижение численности судака отмечалось во всех внутренних водоемах страны более чем 50 лет [20,21]. В последние годы вылов судака варьировал от 14,5 т в 2017 г. до 22,2 т в 2021 г.

Увеличение доли в уловах судака связано с улучшением его кормовой базы – с ростом численности сорной рыбы. В 60-х годах XX столетия в Куйбышевском водохранилище основу питания судака составляли лещ и окунь [22] и среди компонентов пищи отсутствовали тюлька, берш и судак. К 90-м годам в Куйбышевском водохранилище изменились состав и соотношение компонентов ихтиофауны. В этот период в массовых количествах в водохранилище встречалась тюлька, ставшая главной пищей судака. Запасы тюльки в водохранилище оценивались в 9 - 20 тыс. т, а ее возможные уловы - в 4 тыс. т [23]. В этот период отмечается снижение разнообразия в составе пищи судака [24]. По сравнению с 60-ми годами в пище судака в 90-х годах не были встречены укляя, плотва, лещ, ерш, снизилось значение жереха, подуста и окуня. Новым пищевым компонентом, кроме тюльки, стал бычок-кругляк. Тюлька составляла, в среднем, 71,4 % по численности и 31,8 % по массе пищевого комка. На втором месте по частоте встречаемости в пище судака находилась его собственная молодь (11,8 %), а по массе она была на первом месте (40,8 %). В этот период для судака было характерно отсутствие выраженной избирательности к пище. Он питался наиболее многочисленными компонентами экосистемы, доминирующими в пелагиали: зимой, весной и осенью, в основном, тюлькой, а летом – собственной молодь

[24]. В начале XXI столетия основными компонентами рациона судака были тюлька, уклея, густера, лещ, плотва, берш, судак и окунь [25]. Летом и осенью основу пищевого комка составляли тюлька (до 100% массы пищевого комка) и уклея (до 50%). Анализ избирательности питания судака показал, что предпочитаемой пищей являются берш, синец и тюлька (индексы избирания соответственно 0,9; 0,6; 0,5). Такие виды как лещ, плотва, густера, уклея, язь относились к избегаемой пище. Кроме рыб в пище судака в малых количествах встречались ракообразные, личинки насекомых и моллюски. Изучение питания судака в Куйбышевском водохранилище подтверждает его высокую значимость как биологического мелиоратора. Одной из основных особенностей питания судака было преобладание весной в составе пищевого комка окуневых рыб (берша и окуня) и плотвы, а летом и осенью основу питания судака составляли тюлька (12-100%) и уклея (до 50%).

Потенциальная рыбопродукция к началу XXI столетия в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан составляла около 200 кг/га, что соответствует возможной ежегодной рыбной продукции около 6000 т, из них на долю рыб-бентофагов приходилось 12,7% [7, 10]. Сазан в этих условиях уже не является лучшим объектом для работ по направленному формированию ихтиофауны. С позиций использования водохранилища как базы пастбищной аквакультуры возрастает роль планктофагов (фитопланктофагов+зоопланктофагов) – пестрого толстолобика и его гибридов с белым толстолобиком и, возможно, веслоноса, как наиболее ценного объекта. Их конкурентами по питанию в водохранилище в настоящее время являются синец и тюлька. Поскольку вселения ценных планктофагов не проводится, закономерно предположить увеличение в уловах аборигенных планктофагов. Тюлька за последний период превратилась из вида, экономическая целесообразность вылова которого обсуждалась [23], в вид, квота на вылов которой составила в последние годы 41,9 – 49,9 тонн (рис.9).

Анализ данных по уловам свидетельствует о росте доли малоценной рыбы в последний период. К 2010 г. малоценные виды составили 53,4% в уловах, в последние годы их доля выросла до 62,3% - 68,3%.

Синец среди рыб, общий допустимый улов которых не устанавливается в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан, по квотам вылова на втором месте (рис.10).

В этих условиях с позиций улучшения состава ихтиофауны и ее направленного формирования значительно возрастает роль таких активных хищников, как судак и берш.

Берш или волжский судак - *S.volgense* G. – является обитателем только пресноводных бассейнов Каспийского и Черного морей [16]. В последнее время в результате ирригационного строительства его ареал также расширяется. Он стал обитателем р. Кубани, ловится в Краснодарском водохранилище, Шапсугском, Крюковском и Кубанском лиманах [26], акклиматизирован в оз. Балхаш. Берш является промысловым видом, численность которого в 2000-х годах повсеместно снижалась.

В Куйбышевском водохранилище берш в уловах до 1973 г. отдельно не учитывался. В 80-х годах уловы берша составляли от 75 до 140 т в год (рис.10). В 90-х годах вылов берша снижался и составлял около 40 т в год. В 2000-х годах уловы берша варьировали около 27-35 т в год. В 2009 г его уловы составляли около 78 т (2,7% от общего улова.) [10, 7]. В настоящее время уловы судака, берша и окуня растут (рис.10, 11) и составляют соответственно более 250 т, более 100 т и более 150 т. В связи с изменениями, происходящими в экосистеме Куйбышевского водохранилища, отмечаются изменения в биологии этих видов.

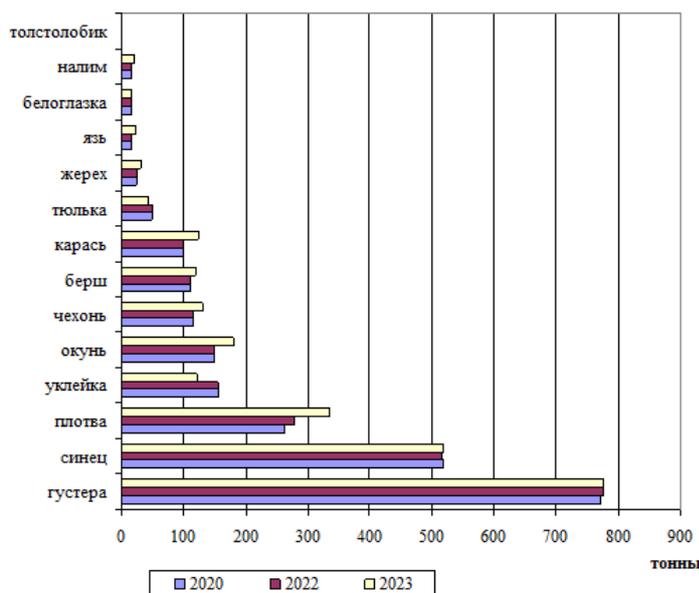


Рис. 9. Квоты на вылов рыб в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан, общий допустимый улов которых не устанавливается

Fig.9. Quotas for fishing in the Kuibyshev reservoir within the Republic of Tatarstan, the total allowable catch of which is not established

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Основу питания берша составляют тюлька, молодь берша и судака, ракообразные (гаммариды, мизиды, кумовые рачки) и моллюски (дрейссена, литоглиф, живородка). В пищевых комках бершей массой 230-260 г (возраст 3+ - 4+) встречается до 10 экз. тюльки.

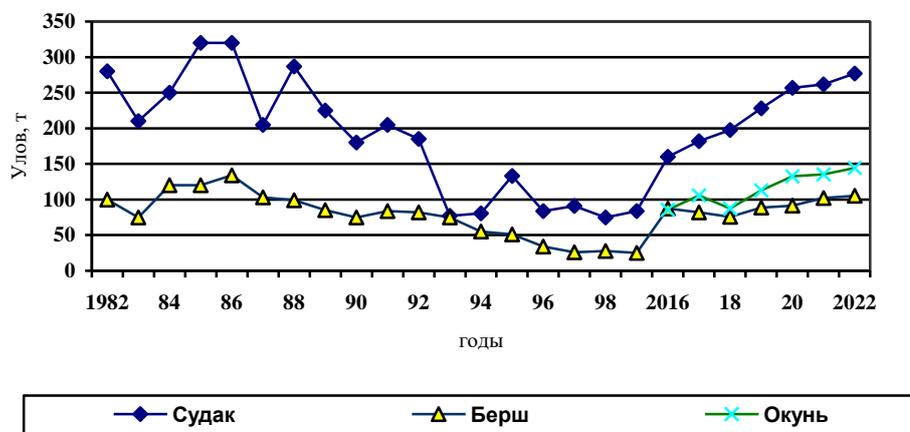


Рис. 10. Уловы судака, берша и окуня в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан

Fig.10. Catches of zander, bersh and perch in the Kuibyshev reservoir within the Republic of Tatarstan

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Важное значение в питании берша имеют представители понто-каспийской фауны – гаммариды (до 36%), мизиды (*Paramysis intermedia*, *P.ullskyi*) (до 11,8%), кумовые раки (до 8,6%), дрейссена (до 76%). Из моллюсков кроме *Dreissena polymorpha* (Pall.) в питании берша встречалась *D.bugensis* (Andr.) и *Viviparus viviparus* L. Длина дрейссен варьировала в пищеварительных трактах от 6 до 15,2 мм, а их масса – от 37 до 292 мг. В питании берша в единичных экземплярах встречались занесенные в Красную Книгу Республики Татарстан узкопалые раки (*Pontastacus leptodactylus* Esch.). На рис.11 представлены данные по вылову судака, берша и окуня в Куйбышевском водохранилище по регионам. Из данных, представленных на рис. 10 и 11 видно, что основным объектом лова является судак, а окунь в уловах преобладает по сравнению с бершом.

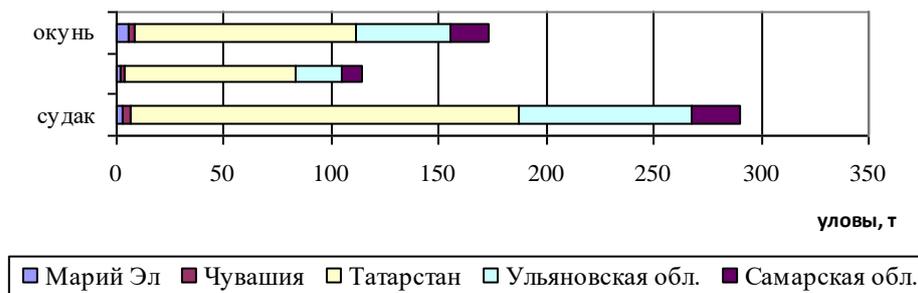


Рис. 11. Уловы судака и берша и окуня в Куйбышевском водохранилище по регионам в 2017 г. *Fig.11. Catches of zander and bersh and perch in the Kuibyshev reservoir by region in 2017*

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Роста численности судака добиваются при направленном формировании ихтиофауны водохранилищ вселением его молоди. В современной ситуации отмечается увеличение запасов и ресурсов судака и берша. Это связано с существенным увеличением сорной рыбы, а значит – кормовой базы хищников. С этих позиций интересно рассмотреть вылов тюльки как важного компонента питания судака и берша. Запасы тюльки [23, 7] во всем Куйбышевском водохранилище оценивались в конце XX столетия в 4500 т. Квоты на вылов тюльки и ее фактический вылов в последний период представлены на рис.12. При этом утвержденные квоты добычи тюльки составили в 2020, 2022 году 49,9 тонны, а в 2023 году – 41,9 тонны.

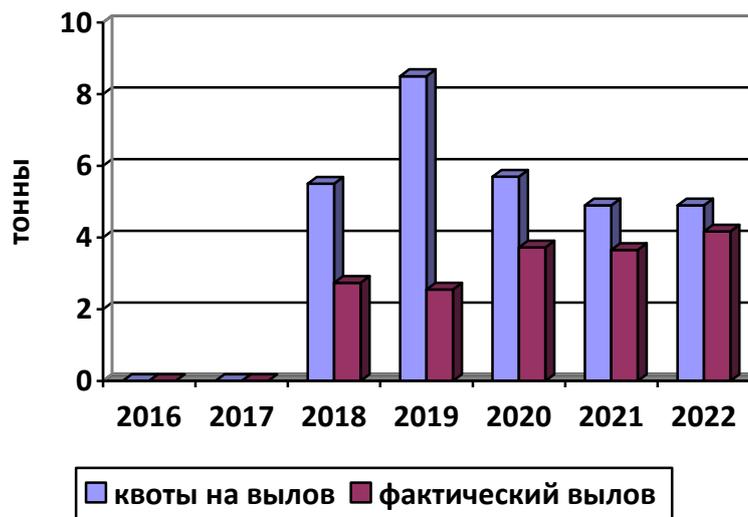


Рис. 12. Квоты на вылов и фактический вылов тюльки в Куйбышевском водохранилище в Республике Татарстан

Fig.12. Catch quotas and actual catch of kiltka in the Kuibyshev reservoir in the Republic of Tatarstan

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Таким образом, фактический вылов тюльки составляет 5,1% – 8,4% от утвержденной квоты. Поскольку именно тюлька играет значительную роль в питании судака и берша отсутствие ее значительного вылова способствует росту численности и, соответственно, уловов этих ценных хищников. Сбросы воды из водохранилища не отражаются существенным образом на запасах судака и берша, поскольку судак является пластичным видом в отношении мест нереста и использует для нереста коряги, пни, песок в качестве нерестового субстрата на прирусловых участках с глубинами до 1,5 м и участках открытой воды с глубиной 2-8 м, а берш имеет порционный нерест. Окунь – нетребователен к субстрату, использует для нереста прибрежные и открытые участки, погруженную растительность, коряги, пни.

Можно отметить, что если в начале XXI столетия отмечалась четкая тенденция увеличения совокупной доли малоценных и сорных видов рыб [15, 25], то в последние годы совокупная доля ценных видов рыб перестала снижаться и даже выросла (таблица 1).

Таблица 1. Соотношение ценных и малоценных видов в составе уловов Куйбышевского водохранилища в Республике Татарстан

The ratio of valuable and low-value species in the composition of the catches of the Kuibyshev reservoir in the Republic of Tatarstan

Ценные виды	Квоты вылова, %			Малоценные виды	Квоты вылова, %		
	2017	2021	2022		2017	2021	2022
Стерлядь	0,17	-	-	Густера	22,31	21,00	20,93
Сазан	0,84	1,70	1,79	Синец	16,99	14,10	13,97
Сом	0,26	0,31	0,33	Плотва	7,50	7,13	7,49
Судак	6,52	7,80	7,77	Чехонь	3,40	3,10	3,10
Щука	0,56	0,98	0,97	Берш	3,32	3,02	3,00
Налим	0,46	0,42	0,42	Окунь	4,13	4,04	4,00
Лещ	22,85	26,50	26,38	Карась	2,33	2,82	2,71
Толстолобик	0,06	0,05	0,05	Уклея	5,09	4,21	4,19
				Тюлька	1,54	1,36	1,35
				Жерех	0,73	0,68	0,67
				Язь	0,47	0,45	0,46
				Белоглазка	0,47	0,42	0,42
Всего	31,72	37,67	37,71	Всего	68,28	62,23	62,29

По данным доклада в 2020 г. Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [27] отмечаются две основные тенденции в изменении вылова рыбы по основным водосборным речным бассейнам. Первая тенденция – рост вылова рыбы во внутренних водоемах – отмечается в 37 странах, на долю которых приходилось 58,7 % мирового вылова рыбы во внутренних водоемах: самый значительный рост был отмечен в Китае, Индии, Камбодже, Индонезии, Нигерии, Российской Федерации и Мексике. В 28 странах, на которые приходилось 5,9 % мирового вылова во внутренних водоемах, вылов сокращался, а объем продукции аквакультуры значительно рос – в Бразилии, Таиланде, Вьетнаме и Турции. Доля реки Волги в глобальном вылове рыбы по основным водосборным речным бассейнам в мире от общего вылова – 0,28 %, а Каспийского моря – 0,76 % [27].

К началу XXI века средняя рыбопродуктивность Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан оценивалась в 5кг/га, а с учетом браконьерского лова – в 14 кг/га [10, 15]. Проведенная современная оценка рыбопродуктивности рыбопромысловых участков Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан по результатам фактического вылова рыбы представлена на рис.13.

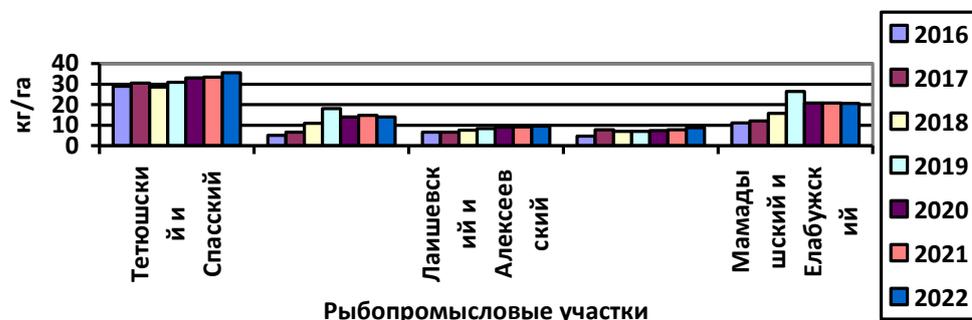


Рис.13. Рыбопродуктивность (кг/га) участков Куйбышевского водохранилища по результатам фактических выловов рыбы

Fig.13. Fish productivity (kg/ha) of sections of the Kuibyshev reservoir based on the results of actual fish catches

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Как видно из приведенных на рис. 13, 14 данных на всех рыбопромысловых участках Куйбышевского водохранилища рыбопродуктивность в последние годы возрастает.

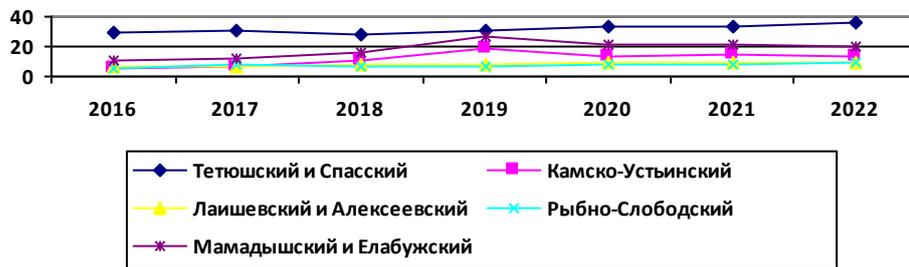


Рис. 14. Изменение рыбопродуктивности (кг/га) участков Куйбышевского водохранилища по результатам фактических выловов рыбы по года

Fig.14. Change in fish productivity (kg/ha) of sections of the Kuibyshev reservoir based on the results of actual fish catches by years

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Самая высокая рыбопродуктивность по результатам фактического вылова рыбы отмечается на Тетюшском и Спасском участках. Средняя за последние годы рыбопродуктивность составила на Тетюшском и Спасском участках – 31,53 кг/га, Камско-Устьинском – 11,89 кг/га, Лаишевском и Алексеевском – 8,11 кг/га, Рыбно-Слободском – 7,19 кг/га, Мамадышском и Елабужском участках – 18,15 кг/га.

Таким образом, отмечающийся процесс ускорения эвтрофирования Куйбышевского водохранилища в условиях изменения внешних климатических условий и современного гидрологического режима приводит не только к «цветению» воды, но и к увеличению рыбопродуктивности. Учитывая, что в начале XXI столетия рыбопродуктивность Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан оценивалась в 5кг/га по данным официальной статистики, а с учетом браконьерского лова – в 14 кг/га, а в настоящее время она только по данным официальной статистики варьирует от 7 до 35 кг/га, можно сделать вывод об увеличении степени трофии Куйбышевского водохранилища (в пределах мезотрофного класса качества вод).

Заключение

В работе анализируются качественный и количественный состав водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища и их особенностей в условиях современных климатических характеристик и гидрологического режима. Особое внимание уделено состоянию ихтиоценозов Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан.

Рассмотрены в историческом аспекте изменения в уловах стерляди. Показана необходимость организации Государственного природного зоологического заказника регионального значения «Нерестилище стерляди».

Проведен анализ динамики изменения уловов рыбы в р.Волга и Куйбышевском водохранилище. Уловы в реке Волга до зарегулирования колебались от 1350 до 1910 тонн. Максимальные уловы в водоемах Татарстана до образования Куйбышевского водохранилища приходятся на начало 30-х годов XX столетия – 2020 (1932 г.) – 2300 тонн (1933 г.). В 1950-е годы при организации Куйбышевского водохранилища планировались уловы рыбы в объеме 20-24 тыс. тонн, основу которых должны формировать лещ (35%), сазан (15%), судак (10%), щука (8%) и осетровые (2%). Остальные виды должны были составлять 30%. Промысловый лов рыбы в Куйбышевском водохранилище берет начало с 1961 г. До этого был период запрещения вылова для наращивания стада рыб. Первые максимальные фактические уловы были отмечены в 1963- 1966 годах – 2,5 – 3,2 тыс.т. Особенно высокой в уловах была доля щуки – в 1963 г. ее выловили около 600 т в Республике Татарстан и 1400 т в целом по водохранилищу. К 70-м годам XX столетия были сделаны выводы о том, что лещ, судак смогли адаптироваться к водохранилищным условиям и способны обеспечить пополнение стада рыб за счет естественного воспроизводства. А такие виды как щука и синец, из-за недостатка мест для откладывания икры не смогут поддерживать численность на высоком уровне. С 1970 –х по 1990-е годы уловы в Республике Татарстан колебались около 2000 тонн в год. Снижались уловы судака и щуки. Мелкий частик (синец, густера, плотва, чехонь, берш) по видам промыслом не

учитывался. В 2000-х годах была отмечена тенденция увеличения доли малоценных и сорных видов рыб и сокращения доли ценных промысловых видов. К 2010 г. малоценные виды составили 53,4% в уловах, в последние годы их доля выросла до 62,3% - 68,3%.

В работе представлена динамика современных уловов в Куйбышевском водохранилище. Представлены данные по соотношению (%) рыб в фактических уловах в Куйбышевском водохранилище в пределах Республики Татарстан во временном аспекте с шагом в 10 лет: в 1998 г, 2008 г. и в 2018 г. Показано, что основу промысла формируют лещ, густера, синец, плотва и судак. Синец, густера и лещ вместе практически определяют около 65% вылова. В этих условиях с позиций улучшения состава ихтиофауны и ее направленного формирования значительно возрастает роль таких активных хищников, как судак и берш.

Рассмотрены особенности динамики уловов судака и берша. В последние годы вылов судака варьировал от 14,5 т в 2017 г. до 22,2 т в 2021 г. Увеличение доли в уловах судака связано с улучшением его кормовой базы – с ростом численности сорной рыбы. В 60-х годах XX столетия в Куйбышевском водохранилище основу питания судака составляли лещ и окунь и среди компонентов пищи отсутствовали тюлька, берш и судак. К 90-м годам в Куйбышевском водохранилище изменились состав и соотношение компонентов ихтиофауны. В этот период в массовых количествах в водохранилище встречалась тюлька, ставшая главной пищей судака. Анализ избирательности питания судака показал, что предпочитаемой пищей являются берш, синец и тюлька (индексы избирания соответственно 0,9; 0,6; 0,5). Такие виды как лещ, плотва, густера, укля, язь относились к избегаемой пище.

В Куйбышевском водохранилище берш в уловах до 1973 г. отдельно не учитывался. В 80-х годах уловы берша составляли от 75 до 140 т в год (рис.10). В 90-х годах вылов берша снижался и составлял около 40 т в год. В 2000-х годах уловы берша варьировали около 27-35 т в год. В 2009 г его уловы составляли около 78 т (2,7% от общего улова.) [10, 7]. В настоящее время уловы судака, берша и окуня растут и составляют, соответственно, более 250 т, более 100 т и более 150 т. Увеличение запасов и ресурсов судака и берша связано с существенным увеличением сорной рыбы – кормовой базы этих хищников. Рассмотрены данные по квотам на вылов тюльки и ее фактический вылов в последний период представлены. Показано, что фактический вылов тюльки составляет 5,1% – 8,4% от утвержденной квоты.

Сделан вывод о том, что отсутствие значительного вылова тюльки способствует росту численности и, соответственно, уловов берша и судака. Сбросы воды из водохранилища не отражаются существенным образом на запасах судака и берша,

Проведена оценка рыбопродуктивности Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан во временном аспекте и по рыбопромысловым участкам. Показано, что на всех рыбопромысловых участках Куйбышевского водохранилища рыбопродуктивность в последние годы возрастает. Самая высокая рыбопродуктивность по результатам фактического вылова рыбы отмечается на Тетюшском и Спасском участках. Средняя за последние годы рыбопродуктивность составила на Тетюшском и Спасском участках – 31,53 кг/га, Камско-Устьинском – 11,89 кг/га, Лаишевском и Алексеевском – 8,11 кг/га, Рыбно-Слободском – 7,19 кг/га, Мамадышском и Елабужском участках – 18,15 кг/га. Сделан вывод, о том, что отмечающийся процесс ускорения эвтрофирования Куйбышевского водохранилища в условиях изменения внешних климатических условий и современного гидрологического режима приводит не только к «цветению» воды, но и к увеличению степени трофии (в пределах мезотрофного класса качества вод).

Литература

- 1.Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Современная гидрологическая характеристика Куйбышевского водохранилища как основа для развития водных биоресурсов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т.25. № 1. С. 166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
- 2.Калайда М.Л. Задачи развития аквакультуры в Республике Татарстан на современном этапе/ Рыбоводство и рыбное хозяйство, 2017,№8(139).-С.8-17.
3. Кузнецов В.А., Калайда М.Л. Ихтиологические исследования и подготовка кадров на кафедре зоологии позвоночных Казанского университета // Первый конгресс ихтиологов России.- М.: ВНИРО, 1997.-С.472.
- 4.Отчет правления Казанского отдела Российского Общества рыбоводства и рыболовства о деятельности Отдела за 1916 год.-Казань: Типо-литография Губернского Правления,1917.-62 с.

5. Лукин А.В., Сильченко Г.Ф. О повторных нерестах белуги в Куйбышевском водохранилище и гибридах стерлядь х белуга, осетр х стерлядь // Взаимодействие между компонентами экологических систем.- Казань: изд-во КГУ, 1985.- С. 174-177.
6. Лукин А.В., Смирнов Г.М., Платонова О.П. Рыбы Среднего Поволжья.- Казань, 1971.- 85 с.
7. Калайда М.Л. История и перспективы развития рыбного хозяйства Татарстана.- Казань: Изд-во «Матбугат йорты», 2001.- 96 с.
8. Лукин А.В. Наблюдения над биологией стерляди на Тетюшском нерестилище «Черемша» летом 1934 г.// Труды Общества естествоиспытателей при Казанском университете.-Т.LV, вып.1-2.- Казань: Изд-во Казанского гос.ун-та им. В.И.Ульянова-Ленина, 1937.- С.143-170.
9. Лукин А.В. Основные черты экологии осетровых в Средней Волге.// Труды Общества естествоиспытателей при Казанском университете.-Т.LVII, вып.3-4.- Казань: Изд-во Казанского гос.ун-та им. В.И.Ульянова-Ленина, 1947.- С.39-143.
10. Калайда М.Л. Продукционная характеристика водоемов Среднего Поволжья как базы пастбищной аквакультуры (на примере Республики Татарстан) : Автореф. дис. ...доктора биологических наук.- М., 1998.- 58 с.
11. Калайда М.Л. Стерлядь как возможный объект аквакультуры в Республике Татарстан /Создание и эксплуатация ремонтно-маточных стад осетровых рыб с использованием теплых вод различного происхождения.- С.П.б., 2003. С.49-56.
12. Kalayda M. L., Abdrakhmanov I.K., Khamitova M.F., Kalayda A.A. Release of sterlet (lat. *Acipenser ruthenus*) in the Kuibyshev reservoir is an important task for the development of aquaculture. International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum 2018. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 288 (2019) 012044, doi:10.1088/1755-1315/288/1/012044.
13. Стерлядь Куйбышевского водохранилища и пути ее приспособления к новому существованию. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1981.– 87 с.
14. Калайда М.Л., Борисова С.Д., Хамитова М.Ф., Калайда А.А. Воспроизводство стерляди в Поволжском регионе как сложная структурная задача развития аквакультуры //Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2021, № 01 (180)/2021.- С.8-18.
15. Калайда М.Л. Необходимость учета любительского и браконьерского рыболовства при аквакультуре водохранилищ/ Аквакультура начала XXI века: истоки, состояние, стратегия развития // Материалы Международной научно-практической конференции (п.Рыбное, 3-6 сентября 2002 г.).- М.:Изд-во ВНИРО, 2002.- с. 88-91.
16. Попова О.А. Подотряд Percoidae- окуневидные // Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России.М.:Наука, 1998.- С.113-122.
17. Ladiges W., Vogt D. Die Süßwasserfische Europas. Hamburg; Berlin: Parey, 1979. 299 S.
18. Wheeler A. Key to the fishes of Northern Europe. London: Frederick Warne,1978. 380 p.
19. Čihař Jiří, Malý Jiří Sladkovodni ryby, Praha : Státní zemědělské nakladatelství,1978. 189 s.
20. Кудерский Л.А. Рыбы в опасности: некоторые последствия хозяйственной деятельности на внутренних водоемах //Сб. науч. Трудов: Водные биоресурсы, воспроизводство и экология гидробионтов.- М., 1992.- Вып.66.- С.56-70.
21. Кудерский Л.А. Условия существования и перспективы расселения судака водоемов Карелии // Рыб.хоз-во Карелии. 1964. Вып. 8. С.154-209.
22. Яшанин И.И. Биология судака *Lucioperca lucioperca* (L.) Центрального плеса и Черемшанского залива Куйбышевского водохранилища и особенности формирования его запасов.- Автореф...канд. Дис.,Казань, 1968.- 14 с.
23. Браславская Л.М., Махотина М.К. Использование свободной экологической ниши рыбами Куйбышевского водохранилища // Сб. научных трудов ГосНИОРХ.- 1988.- Вып.280.- С.34-36.
24. Зусмановский Г.С. Биология судака центральной части Куйбышевского водохранилища: автореф.дис...канд.биол.наук.- Казань 1994.- 21 с.
25. Калайда М.Л. Роль экологических факторов в заболеваемости судака и берша / Проблемы патологии, иммунологии и охраны здоровья рыб и других гидробионтов // Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции.-М.-Россельхозакадемия – 2003.- с.49-50.

26. Москул Н.Г. Морфобиологическая характеристика берша *Stizostedion volgense* (Gmelin) и его роль в экосистеме водоемов бассейна Кубани. Дис....канд.биол.наук, Ростов-на-Дону, 2003.- 23 с.

27. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. // Состояние мирового рыболовства и аквакультуры, 2018. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/Состояние202018.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

References

1. Kalaida ML, Sharafutdinov RG. Modern hydrological characteristics of the Kuibyshev reservoir as a basis for the development of aquatic biological resource. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(1):166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
2. Kalaida ML. Tasks for the development of aquaculture in the Republic of Tatarstan at the present stage. *Fish farming and fisheries*, 2017;8(139):8-17.
3. Kuznetsov VA, Kalaida ML. Ichthyological research and training at the Department of Vertebrate Zoology of Kazan University. *First congress of ichthyologists of Russia*. М.:VNIRO, 1997. P.472.
4. *Report of the Board of the Kazan Department of the Russian Society of Fisheries and Fisheries on the activities of the Department for 1916*. Kazan: Type-lithography of the Provincial Board, 1917. 62 p.
5. Lukin AV, Silchenko GF. About repeated spawnings of beluga in the Kuibyshev reservoir and hybrids sterlet x beluga, sturgeon x starlet. *Interaction between components of ecological systems*.- Kazan: pub. h. KGU, 1985. P. 174-177.
6. Lukin AV, Smirnov GM, Platonova OP. Fish of the Middle Volga. Kazan, 1971. 85 p.
7. Kalaida ML. History and prospects for the development of fisheries in Tatarstan. Kazan: pub. h. «Matbugat yorty», 2001. 96 p.
8. Lukin AV. *Observations on the biology of the sterlet at the Tetyush spawning ground Cheremsha in the summer of 1934*. Proceedings of the Society of Naturalists at Kazan University.- T.LV, iss.1-2.- Kazan: pub. h. of Kazan State University n.a. Ulyanov-Lenin, 1937.- P.143-170.
9. Lukin AV. *Main features of sturgeon ecology in the Middle Volga*. Proceedings of the Society of Naturalists at Kazan University.-V.LVII, iss.3-4. Kazan State University. Ulyanov-Lenin, 1947.P.39-143.
10. Kalaida ML. Productive characteristics of the reservoirs of the Middle Volga region as a base for pasture aquaculture (on the example of the Republic of Tatarstan): Abstract of a doctor of biological sciences thesis.M., 1998. 58 p.
11. Kalaida ML. Sterlet as a possible object of aquaculture in the Republic of Tatarstan / Creation and operation of sturgeon brood stocks using warm waters of various origins.- S.P.b., 2003. P.49-56.
12. Kalaida ML, Abdrakhmanov IK, Khamitova MF, et al. *Release of sterlet (lat. Acipenser ruthenus) in the Kuibyshev reservoir is an important task for the development of aquaculture*. International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum 2018. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 288 (2019) 012044, doi:10.1088/1755-1315/288/1/012044.
13. Sterlet of the Kuibyshev reservoir and ways of its adaptation to a new existence. – Kazan: pub. h. of Kazan University, 1981.87 p.
14. Kalaida ML, Borisova SD, Khamitova MF, Kalaida A.A. Sterlet reproduction in the Volga region as a complex structural task of aquaculture development. *Fish farming and fisheries*. 2021;01 (180):8-18.
15. Kalaida ML. *The need to take into account recreational and poaching fishing in the aquaculture of reservoirs*. Aquaculture at the beginning of the 21st century: origins, state, development strategy. Materials of the International Scientific and Practical Conference (s. fish, 3-6 September 2002).- М.:pub. house VNIRO, 2002.- p. 88-91.
16. Popova OA. Suborder Percoidei- perciform. Annotated Catalog of Cyclostomes and Fishes of Russian Continental Waters. М.:Science, 1998. P.113-122.
17. Ladiges W, Vogt DDie. Süßwasserfische Europas. Hamburg; Berlin: Parey, 1979. 299 S.
18. Wheeler A. Key to the fishes of Northern Europe. London: Frederick Warne, 1978. 380 p.

19. Čihař Jiří, Malý Jiří Sladkovodni ryby, Praha : Státní zemědělské nakladatelství, 1978. 189 s.
20. Kudersky LA. Fish in danger: some consequences of inland water management //coll. of scientific papers: Aquatic bioresources, reproduction and ecology of hydrobionts M., 1992.- Iss.66.- P.56-70.
21. Kudersky LA. Conditions for the existence and prospects for the settlement of zander in water bodies of Karelia. *Fisheries of Karelia*. 1964;8:154-209.
22. Yashanin II. *Biology of zander *Lucioperca lucioperca* (L.) from the Central Reach and Cheremshansky Bay of the Kuibyshev Reservoir and features of its stock formation*. Abstract of the PhD thesis, Kazan, 1968. 14 p.
23. Braslavskaya LM, Makhotina MK. *Use of a Free Ecological Niche by Fishes of the Kuibyshev Reservoir*. Coll. of scientific works of GosNIORKh.- 1988.- Iss.280.- P.34-36.
24. Zusmanovsky GS. *Biology of zander in the central part of the Kuibyshev reservoir: abstract of the PhD thesis*. Kazan 1994.21 p.
25. Kalaida ML. *Biology of zander in the central part of the Kuibyshev reservoir All-Russian Scientific and Practical Conference*.M. Russian Agricultural Academy – 2003. p.49-50.
26. Moskul NG. *Morphobiological characteristics of the bersh *Stizostedion volgensis* (Gmelin) and its role in the ecosystem of water bodies of the Kuban basin*. Abstract of a doctor of biological sciences thesis, Rostov-on-Don, 2003. 23 p.
27. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. The State of World Fisheries and Aquaculture, 2018. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/Состояние202018.pdf> (date of access: 20.02.2020).

Шифр научной специальности:

Смежные шифры научной специальности:

Получено 02.05.2023 г.

Отредактировано 29.05.2023 г.

Принято 31.05.2023 г.

Сдано в набор 20.04.2023г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати г. 14.08.2023 . Формат 60x90/8
Усл. печ. л. 21,2 Уч.изд. л. 15,62
Заказ № 5282 Цена свободная
Дата выхода в свет г. 23.08.2023 .