

ISSN 2949-1215



*Российская Академия Наук*  
**ТРУДЫ**  
Кольского научного центра РАН

**6/2023(14)**

**СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**0+**

*Российская Академия Наук*

# ТРУДЫ

6/2023(14)

Научно-информационный журнал  
Основан в 2010 году  
Выходит 4 раза в год

Кольского научного центра. Серия: Технические науки

Главный редактор  
акад. РАН, д. г.-м. н. С. В. Кривовичев

Заместитель главного редактора  
к. б. н. Е. А. Боровичев

Редакционный совет:  
акад. РАН, д. г. н. Г. Г. Матишов,  
чл.-корр. РАН д. б. н. В. К. Жиров,  
чл.-корр. РАН д. т. н. А. И. Николаев,  
чл.-корр. РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев,  
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин,  
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,  
к. т. н. А. С. Карпов (отв. секретарь)

Редколлегия серии:  
чл.-корр. РАН, д. т. н. А. И. Николаев,  
чл.-корр. РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев,  
д. т. н. А. В. Горохов,  
д. х. н. С. Р. Деркач,  
д. т. н. Б. В. Ефимов,  
д. т. н. А. А. Козырев,  
д. т. н. Н. В. Коровкин,  
д. т. н. С. И. Кривошеев,  
д. х. н. С. А. Кузнецов,  
д. т. н. С. В. Лукичев,  
д. т. н. В. А. Марлей,  
д. т. н. М. В. Маслова,  
д. т. н. А. В. Маслобоев,  
д. т. н. В. А. Маслобоев,  
д. т. н. О. В. Наговицын,  
д. т. н. А. Г. Олейник,  
д. т. н. В. В. Рыбин,  
д. т. н. А. Я. Фридман,  
д. т. н. М. Г. Шишаев,  
к. т. н. Т. Н. Васильева,  
к. т. н. И. О. Датъев,  
к. х. н. Д. П. Домонов,  
к. т. н. О. Г. Журавлева,  
к. т. н. А. И. Калашник,  
к. т. н. А. С. Карпов,  
к. т. н. В. В. Колобов,  
к. т. н. Н. М. Кузнецова,  
к. т. н. С. М. Маслобоева,  
к. т. н. В. А. Минин,  
к. т. н. Г. И. Митрофанова,  
к. т. н. А. С. Опалев,  
к. т. н. В. Н. Селиванов,  
к. т. н. И. Э. Семенова,  
к. т. н. А. М. Фёдоров

Ответственный редактор номера  
В. В. Ивонин

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской  
академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН)

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-83502 от 30 июня 2022 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.

Научное издание

Технический редактор В.Ю. Жиганов  
Редактор С.А. Шарам

Подписано к печати 00.00.2023.

Дата выхода в свет 00.00.2023.

Формат бумаги 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 10,7. Заказ № 45. Тираж 500 экз.

Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя и типографии: Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр  
«Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН)  
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14  
Тел.: 8 (81555) 7-53-50; 7-95-95, факс: 8 (81555) 7-64-25  
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru

**СОДЕРЖАНИЕ**

Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е.	Развитие энергетики регионов Северного экономического района.....	5
Минин В. А., Кривцов С. И.	Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения прибрежных потребителей Мурманской области.....	13
Губская Е. И.	Особенности дуговых сталеплавильных печей как потребителей электроэнергии.....	29
Залесова О. В.	Прогнозирование влияния электромагнитного поля контактной сети модернизированного участка Октябрьской железной дороги на ВЛ высокого напряжения.....	39
Лазарев Н. И., Колобов В. В.	Эквивалент магнитного поля масс-спектрометра МИ-1201ИГ.....	48
Лазарева М. А., Колобов В. В.	Построение системы измерения параметров подвесных ОПН на базе микроконтроллера с беспроводной передачей данных.....	53
Колобов В. В., Баранник М. Б., Ивонин В. В.	Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в контуре заземления подстанции.....	59
Бурцев А. В.	Практическое применение метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи.....	66
Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Кизенков А. Н., Сулоев А. А.	Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2022 г.....	73
Климов А. А., Селиванов В. Н.	К вопросу об удельных энергозатратах на разрушение материалов естественного и искусственного происхождения электрофизическими методами.....	84

6/2023(14)

Scientific journal  
Published since 2010  
Publication frequency — four times a year

*Russian Academy of Sciences*  
**TRANSACTIONS**

**Kola Science Centre. Series: Engineering Sciences**

Editor-in-Chief

S. V. Krivovichev, Academician of RAS,  
Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Deputy Editor-in-Chief

E. A. Borovichev, PhD (Biology)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Academician of RAS, Dr. Sc. (Geography),  
V. K. Zhironov, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Biology),  
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),  
I. G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),  
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),  
E. D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics and Mathematics),  
A. S. Karpov, PhD (Engineering) — Executive Secretary

Editorial Board:

A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),  
I. G. Tananaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),  
A. V. Gorokhov, Dr. Sc. (Engineering),  
S. R. Derkach, Dr. Sc. (Chemistry),  
B. V. Efimov, Dr. Sc. (Engineering),  
A. A. Kozirev, Dr. Sc. (Engineering),  
N. V. Korovkin, Dr. Sc. (Engineering),  
S. I. Krivosheev, Dr. Sc. (Engineering),  
S. A. Kuznetsov, Dr. Sc. (Chemistry),  
S. V. Lukichev, Dr. Sc. (Engineering),  
V. A. Marlej, Dr. Sc. (Engineering),  
M. V. Maslova, Dr. Sc. (Engineering),  
A. V. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),  
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),  
O. V. Nagovitsin, Dr. Sc. (Engineering),  
A. G. Oleinik, Dr. Sc. (Engineering),  
V. V. Ribin, Dr. Sc. (Engineering),  
A. Ya. Fridman, Dr. Sc. (Engineering),  
M. G. Shishaev, Dr. Sc. (Engineering),  
T. N. Vasileva, PhD (Engineering),  
I. O. Datjev, PhD (Engineering),  
D. P. Domonov, PhD (Chemistry),  
O. G. Zhuravleva, PhD (Engineering),  
A. I. Kalashnik, PhD (Engineering),  
A. S. Karpov, PhD (Engineering),  
V. V. Kolobov, PhD (Engineering),  
N. M. Kuznetsov, PhD (Engineering),  
S. M. Masloboeva, PhD (Engineering),  
V. A. Minin, PhD (Engineering),  
G. I. Mitrofanova, PhD (Engineering),  
A. S. Opalev, PhD (Engineering),  
V. S. Selivanov, PhD (Engineering),  
I. E. Semenova, PhD (Engineering),  
A. M. Fedorov, PhD (Engineering)

Executive Editor

V. V. Ivonin

Founder — Federal State Budget Institution of Science  
Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian  
Academy of Sciences”

Mass Media Registration Certificate  
ПИ No. ФС77-83502 issued by the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology and Mass Media  
on June, 30 2022

Scientific publication

Technical Editor V.Yu. Zhiganov  
Editor S.A. Sharam

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia  
Tel.: 8 (81555) 7-93-80. Fax: 8 (81555) 7-64-25  
E-mail: ksc@ksc.ru. www.ksc.ru

**CONTENTS**

Kuznetsov N. M., Konovalova O. E.	Development of energy in the regions of the Northern Economic Region.....	5
Minin V. A., Krivtsov S. I.	Prospects for the use of wind energy for heat supply to coastal consumers of the Murmansk region.....	13
Gubskaya E. I.	Features of electric arc furnaces as consumers of electrical energy.....	29
Zalesova O. V.	Forecasting the influence of the electromagnetic field of the modernized section overhead contact system of Oktyabrskaya railway on the HV overhead lines.....	39
Lazarev N. I., Kolobov V. V.	The equivalent of the magnetic field of a mass spectrometer MI-1201IG.....	48
Lazareva M. A., Kolobov V. V.	Construction of a system for measuring the parameters of suspended surge arresters based on a microcontroller with wireless data transmission.....	53
Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V.	Experimental investigation of electromagnetic wave propagation on a substation grounding system.....	59
Burtsev A. V.	Practical application of the method for calculating lightning impact levels on overhead power lines.....	66
Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kizenkov A. N., Suloev A. A.	Analysis of the 2022 lightning activity in the Murmansk region.....	73
Klimov A. A., Selivanov V. N.	To the question of specific energy consumption for the fracture of materials of natural and artificial origin by electrophysical methods.....	84

Научная статья  
УДК 621.9  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.001

## РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА

**Николай Матвеевич Кузнецов<sup>1</sup>, Ольга Евгеньевна Коновалова<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>n.kuznetsov@ksc.ru

<sup>2</sup>o.konvalova@ksc.ru

### Аннотация

Показана структура установленной мощности по типам электростанций объединённой энергосистемы Северо-Запада и регионов Северного экономического района. Для снижения энергоёмкости валового регионального продукта северных регионов в сфере повышения энергетической эффективности необходимо развитие распределённой энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии.

### Ключевые слова:

Северный экономический район, установленная мощность, электростанции, линии электропередачи, тарифы на электроэнергию

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е. Развитие энергетики регионов Северного экономического района // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 5–12. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.001.

Original article

## DEVELOPMENT OF ENERGY IN THE REGIONS OF THE NORTHERN ECONOMIC REGION

**Nikolai M. Kuznetsov<sup>1</sup>, Olga E. Konvalova<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>n.kuznetsov@ksc.ru

<sup>2</sup>o.konvalova@ksc.ru

### Abstract

The structure of installed capacity by types of power plants of the united power system of the North-West and the regions of the Northern economic region is shown. To reduce the energy intensity of the gross regional product of the Northern regions in the field of energy efficiency improvement, it is necessary to develop distributed energy based on renewable energy sources.

### Keywords:

Northern economic region, installed capacity, power plants, power transmission lines, electricity tariffs

### Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### For citation:

Kuznetsov N. M., Konvalova O. E. Development of energy in the regions of the Northern economic region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 5–12. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.001.

### Введение

Развитие новых технологий в энергетике, основанных на возобновляемых источниках энергии, распределённой генерации, интеллектуализации, является одной из ключевых задач в формировании Энергетической стратегии Российской Федерации [1]. Внедрение новых технологий стимулируется государственными мерами, включая субсидии, но сдерживается рыночными экономическими условиями (уровнями цен на традиционные энергоносители).

Для снижения энергоёмкости валового регионального продукта северных регионов в сфере повышения энергетической эффективности [2, 3] предусматривается оптимизация экономических механизмов северного завоза топлива за счёт использования возобновляемых источников энергии и путем реконструкции и модернизации выработавших ресурс энергетических установок, внедрения энергосберегающих технологий.

Энергетика северных регионов [4–6] приобретает распределённый характер с использованием экологически чистых источников энергии: атомной, ветровой, солнечной, энергии малых рек [7–9]. При этом создаётся новая архитектура электроэнергетических систем (архитектура Интернета энергии), обеспечивающая оптимальное энергопотребление, высокую устойчивость и безопасность систем электроснабжения [10].

Актуальными направлениями энергетического перехода от традиционной организации энергетических систем к новым технологиям гибкого построения и интеллектуального управления энергетическими сетями в северных регионах являются:

- развитие локальных энергосистем с распределённой генерацией, работающих как единый управляемый объект с существующей электрической сетью или в островном режиме;
- управление энергетической эффективностью для уменьшения потребности в моменты пиковых нагрузок энергосистемы и снижения потребности системы в установленной мощности электростанций;
- управление спросом, включая изменение цен на электроэнергию, чтобы сократить общесистемные затраты.

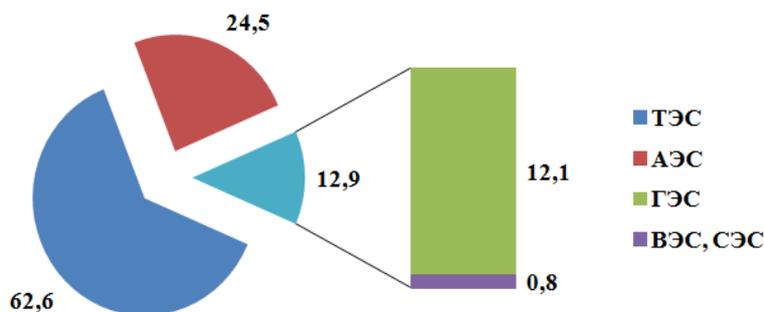
## Основная часть

Несмотря на активное развитие распределённой генерации, основу электроэнергетики в объединённой энергосистеме Северо-Запада (рис. 1) и энергосистемах регионов Северного экономического района составляют существующие системы централизованного электроснабжения, базирующиеся на традиционных электростанциях (тепловые, атомные, гидроэлектростанции) [11]. Структура установленной мощности по типам электростанций [12–15] регионов Северного экономического района представлена на рис. 2.

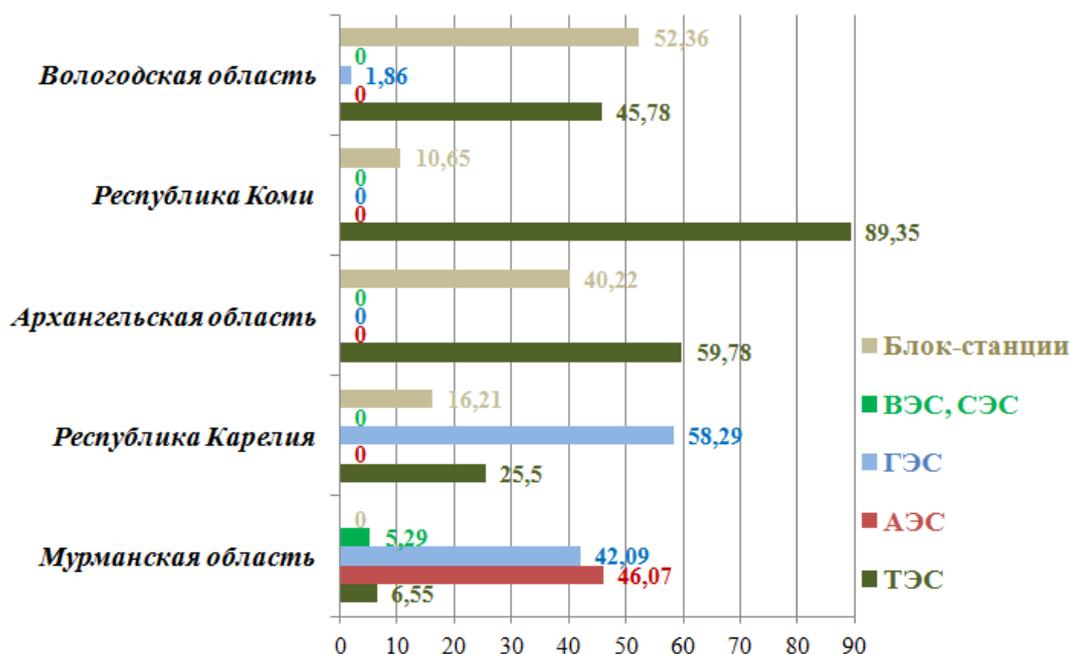
Регионы Северного экономического района имеют межсистемные связи линий электропередачи напряжением 35–750 кВ (рис. 3).

Установленная мощность электрических станций с использованием возобновляемых источников энергии в Мурманской области составляет 47,38 %, в Республике Карелия — 58,29 %.

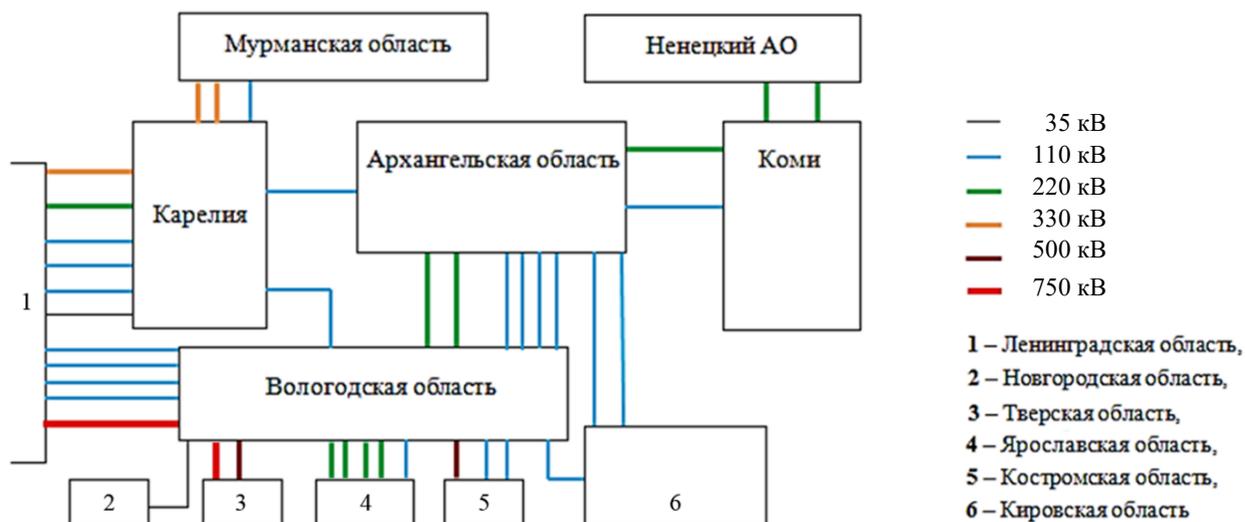
Увеличение доли распределённой генерации на базе возобновляемых источников энергии [16, 17] в структуре производства электрической энергии (в зависимости от структуры и концентрации нагрузки в северных регионах) позволит повысить энергетическую эффективность производства и потребления энергоресурсов, снизить энергоёмкость производимой продукции, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.



**Рис. 1.** Структура установленной мощности по типам электростанций ОЭС Северо-Запада в 2022 г., %  
**Fig. 1.** The structure of installed capacity by types of power plants of the North-West UES in 2022, %



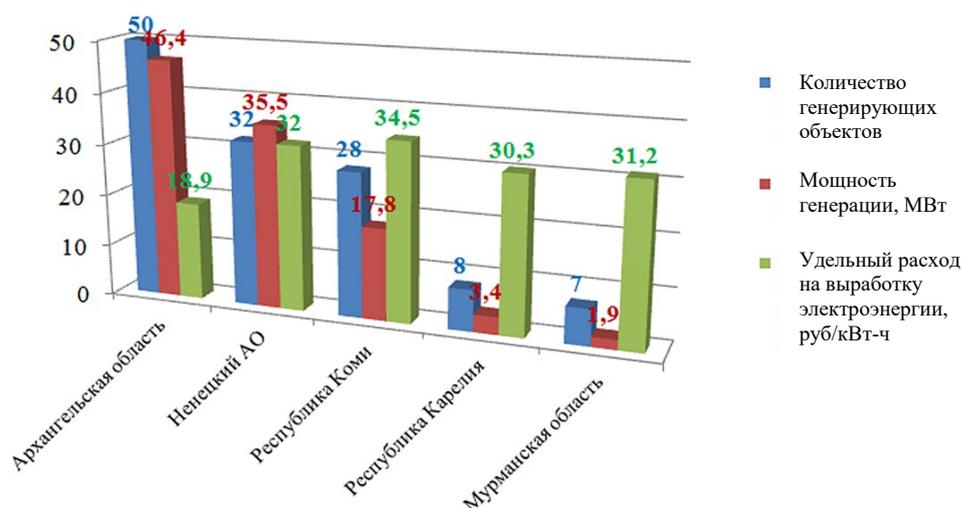
**Рис. 2.** Структура установленной мощности по типам электростанций (%) регионов Северного экономического района  
**Fig. 2.** Structure of installed capacity by type of power plants (%) of the regions of the Northern Economic Region



**Рис. 3.** Схема линий электропередачи напряжением 35–750 кВ регионов Северного экономического района  
**Fig. 3.** Diagram of 35–750 kV power transmission lines in the regions of the Northern Economic District

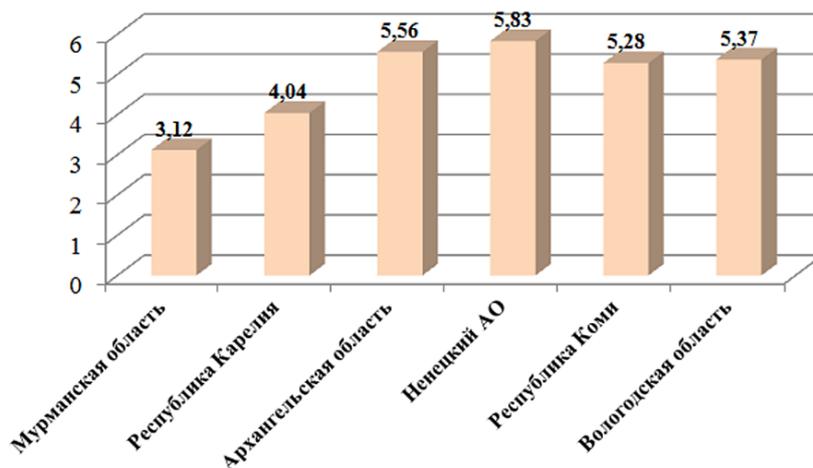
После завершения строительства ветрового парка мощностью 201 МВт [18] установленная мощность на возобновляемых источниках энергии на Кольском полуострове, включая ГЭС, работающих в составе энергосистемы, увеличилась с 42 до 47,38 %.

В регионах Северного экономического района существует большое количество технологически изолированных и труднодоступных территорий [19], не охваченных централизованным электроснабжением (рис. 4). Они характеризуются суровыми климатическими условиями, низкой плотностью населения, низким уровнем использования местных видов топлива и высокими удельными расходами на выработку электроэнергии.



**Рис. 4.** Объекты генерации изолированных и труднодоступных территорий Северного экономического района  
**Fig. 4.** Generation facilities of isolated and hard-to-reach territories of the regions of the Northern Economic Region

Энергообеспечение в изолированных и труднодоступных территориях осуществляется в основном дизельными электростанциями, высокая стоимость дизельного топлива значительно увеличивает себестоимость производимой электроэнергии. Цена для конечного потребителя электрической энергии в удалённых изолированных и труднодоступных территориях этих регионов (рис. 5) значительно превышает аналогичный показатель в Мурманской области (самый низкий по регионам Северного экономического района).



**Рис. 5.** Тарифы на электрическую энергию для населения в 2022 г., руб/кВт·ч [20]  
**Fig. 5.** Electricity tariffs for the population in 2022, RUB/kWh [20]

Высокие тарифы покрываются путем перекрёстного субсидирования, поэтому цена 1 кВт для потребителей изолированных районов ниже затрат на производство электроэнергии. Разницу между стоимостью производства электрической энергии и тарифом, установленным для потребителей, обычно делят между собой бюджеты регионов и потребители ценовых зон оптового рынка электрической энергии и мощности. Федеральные и региональные органы власти проводят системную работу по распределению затрат между потребителями на изолированных территориях и потребителями с централизованным энергоснабжением, а также принимают меры, направленные на повышение энергетической эффективности.

Основные направления реализации государственной политики Российской Федерации по развитию топливно-энергетического комплекса и энергетической инфраструктуры (ТЭК и ЭИ) в регионах Северного экономического района приведены в таблице.

Основные направления развития ТЭК и ЭИ в северных регионах [21]  
The main directions of development of the fuel and energy complex  
and energy infrastructure in the Northern regions [21]

Регион	Направления
Мурманская область	Развитие энергетической инфраструктуры, замена оборудования мазутной теплогенерации на оборудование, использующее сжиженный природный газ, возобновляемые источники энергии и местное топливо
Республика Карелия	Создание каскадов малых гидроэлектростанций при условии подтверждения перспективного спроса на электроэнергию и их экономической эффективности
Архангельская область	Развитие деревообрабатывающей отрасли и целлюлозно-бумажной промышленности, формирование современного лесоперерабатывающего комплекса полного цикла, внедрение технологий производства биотоплива из отходов лесопереработки
Ненецкий автономный округ	Развитие Варандейского, Колгуевского, Харьяго-Усинского и Хасырейского нефтяных минерально-сырьевых центров. Формирование газоконденсатных минерально-сырьевых центров, включая разработку Корвинского и Кумжинского газоконденсатных месторождений, Ванейвисского и Лаявожского нефтегазоконденсатных месторождений
Республика Коми	Развитие угольных минерально-сырьевых центров на базе Печорского угольного бассейна, создание на их основе комплексов глубокой переработки угольного сырья, углехимии. Формирование и развитие нефтегазовых минерально-сырьевых центров на базе Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, в том числе создание мощностей по переработке нефти и газа
Вологодская область	Ввод новых мощностей (мини-ТЭЦ для комбинированной выработки тепло- и электроэнергии с использованием на них в качестве топлива отходов деревообработки или газа). Развитие малой энергетики, использующей местные топливно-энергетические ресурсы (торф, гидроэнергию) [15]

### Заключение

Задачи государственной политики в области топливно-энергетического комплекса, решение которых ускорит экономическое развитие северных территорий:

- стимулирование разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья, повышение коэффициентов извлечения нефти и газа, глубокой переработки нефти, производства сжиженного природного газа;
- развитие системы энергоснабжения, модернизация объектов локальной генерации, расширение использования возобновляемых источников энергии, сжиженного газа и местного топлива.

### Список источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Правительство России: офиц. сайт. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 22.09.2022).
2. Тишков С. В., Щербак А. П. Энергоэффективность и энергосбережение как факторы повышения конкурентоспособности экономики Северного приграничного региона (на примере Республики Карелия) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15, № 4. С. 40–45. doi:10.14529/power150406. EDN: VDMSLJ.
3. Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2020. 92 с. doi:10.37614/978.5.91137.434.1. EDN: GVUSWV.

4. Коновалова О. Е. Энергообеспечение Республики Коми и роль возобновляемой энергетики в энергосистеме // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 8 (17). С. 68–79. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.68-79. EDN: ZXLPFR.
5. Коновалова О. Е. Современное состояние и перспективы энергоснабжения Архангельской области // Газотурбинные технологии. 2021. № 5 (180). С. 6–10. EDN: NPAJLL.
6. Citizens' Behavior as a Driver of Energy Transition and Greening of the Economy in the Russian Arctic: Findings of a Sociological Survey in the Murmansk Region and Karelia / S. Tishkov [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, Issue 3. P. 1460. doi.org/10.3390/app12031460.
7. Кузнецов Н. М., Маслобоев В. А. Коновалова О. Е. Распределённая энергетика регионов Арктической зоны Российской Федерации // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2021. № 1 (5). С. 11–21. doi:10.51823/74670\_2021\_1\_11. EDN: OCHFWR.
8. Иванов А. В., Складчиков А. А., Хренников А. Ю. Развитие электроэнергетики арктических регионов Российской Федерации с учётом использования возобновляемых источников энергии // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 62–80. doi:10.24412/2658-4255-2021-2-62-80.
9. Кузнецов Н. М. Развитие ветроэнергетики на Кольском полуострове // Фундаментальные исследования. 2022. № 9. С. 37–41. doi:10.17513/fr.43324. EDN: GHTSVW.
10. Змиева К. А. Интеграция зелёной и возобновляемой энергетики в интеллектуальную энергетическую систему арктических территорий посредством технологий блокчейна // Российская Арктика. 2021. № 4 (15). С. 81–91. doi:10.24412/2658-4255-2021-4-81-91.
11. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2022–2028 годы // Министерство энергетики РФ: офиц. сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22853> (дата обращения: 28.09.2022).
12. Схема и программа развития электроэнергетики Мурманской области на 2023–2027 годы // Министерство энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Мурманской области: офиц. сайт. URL: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/> (дата обращения: 03.10.2022).
13. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Республики Карелия на период до 2025 года // Официальный интернет-портал Республики Карелия. URL: [https://gov.karelia.ru/legal\\_acts/161619/](https://gov.karelia.ru/legal_acts/161619/) (дата обращения: 05.10.2022).
14. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Коми на 2022–2026 годы // Минстрой Республики Коми: офиц. сайт. URL: [https://arch.rkomi.ru/uploads/documents/poviy\\_sipr\\_utverzhdeniy\\_2022-07-05\\_18-17-53.docx](https://arch.rkomi.ru/uploads/documents/poviy_sipr_utverzhdeniy_2022-07-05_18-17-53.docx) (дата обращения: 05.12.2022).
15. Схема и программа развития электроэнергетики Вологодской области на 2023–2027 годы. URL: <http://files.ipbd.ru/files/3500202204290006.pdf> (дата обращения: 27.12.2022).
16. Коновалова О. Е. Энергетическое использование возобновляемых речных ресурсов Северного экономического района РФ // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 5–18. С. 57–69. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.57-69. EDN: NVFDNG.
17. Кузнецов Н. М. Древесные отходы — дополнительный источник энергии на Северо-Западе России // Горн. журн.: спецвып. 2004. С. 119–120. EDN: WFNRTD.
18. Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е. Развитие распределённой энергетики в Мурманской области // Фундаментальные исследования. 2021. № 5. С. 122–127. doi:10.17513/fr.43049. EDN: YCTFPG.
19. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России: анализ. докл., март 2020 г. / Аналитический центр при Правительстве РФ. URL: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/genерации\\_v\\_ITT.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/genерации_v_ITT.pdf) (дата обращения: 28.09.2022).
20. Тарифы на электрическую энергию для населения в регионах России в 2022 году / ООО «Платформа» // P4Energy: сайт. 2022. 24 октября. URL: <https://p4energy.ru/2022/10/ee2022/> (дата обращения: 27.04.2023).
21. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (дата обращения: 28.09.2022).

## References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (accessed 22.09.2022).
2. Tishkov S. V., Shcherbak A. P. Energoeffektivnost' i energosberezhenie kak faktory povysheniya konkurentosposobnosti ekonomiki Severnogo prigranichnogo regiona (na primere Respubliki Kareliya) [Energy efficiency and energy conservation as factors for increasing competitiveness of the economy of the Northern Border Region (on the example of the Republic of Karelia)]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 40–45. (In Russ.). doi:10.14529/power150406. EDN: VDMSLJ.
3. Kuznetsov N. M. *Upravlenie energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, publ. KSC RAS, 2020, 92 p. doi:10.37614/978.5.91137.434.1. EDN: GVUSWV.
4. Konovalova O. E. Energoobespechenie respubliky Komi i rol' vozobnovlyаемой energetiki v energosisteme [Energy supply of the Komi Republic and the role of renewable energy in the energy system]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2018, Vol. 9, No. 8(17), pp. 68–79. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.68-79. EDN: ZXLPFR.
5. Konovalova O. E. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy energosnabzheniya Arkhangel'skoy oblasti [The current state and prospects of power supply of the Arkhangelsk region]. *Gazoturbinnnye tekhnologii* [Gas turbine technologies], 2021, No. 5 (180), pp. 6–10. (In Russ.). EDN: NPAJL.
6. Tishkov S., Tleppayev A., Karginova-Gubinova V., Volkov A., Shcherbak A. Citizens' Behavior as a Driver of Energy Transition and Greening of the Economy in the Russian Arctic: Findings of a Sociological Survey in the Murmansk Region and Karelia. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Issue 3, pp. 1460. doi.org/10.3390/app12031460.
7. Kuznetsov N. M., Masloboev V. A., Konovalova O. E. Raspredelyonnaya energetika regionov Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Distributed energy in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. *Arktika 2035: aktual'nye voprosy, problemy, resheniya* [The Arctic 2035: actual issues, problems, solutions], 2021, No. 1 (5), pp. 11–21. (In Russ.). doi:10.51823/74670\_2021\_1\_11. EDN: OCHFWR.
8. Ivanov A. V., Skladchikov A. A., Khrennikov A. Yu. Razvitie elektroenergetiki arkticheskikh regionov Rossiyskoy Federatsii s uchytom ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii [Development of electric power industry in the arctic regions of the Russian Federation, considering the use of renewable energy sources]. *Rossiyskaya Arktika* [Russian Arctic], 2021, No. 13, pp. 62–80. (In Russ.). doi:10.24412/2658-4255-2021-2-62-80.
9. Kuznetsov N. M. Razvitie vetroenergetiki na Kol'skom poluostruve [Development of wind power on the Kola Peninsula]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2022, No. 9, pp. 37–41. (In Russ.). doi:10.17513/fr.43324. EDN: GHTSVW.
10. Zmieva K. A. Integratsiya zelyonoy i vozobnovlyаемой energetiki v intellektual'nuyu energeticheskuyu sistemu arkticheskikh territoriy posredstvom tekhnologiiy blokcheyna [Integration of green and renewable energy into the intelligent energy system of the arctic areas through blockchain technologies]. *Rossiyskaya Arktika* [Russian Arctic], 2021, No. 4 (15), pp. 81–91. (In Russ.). doi:10.24412/2658-4255-2021-4-81-91. EDN: QLYPDR.
11. *Skhema i programma razvitiya Edinoy energeticheskoy sistemy Rossii na 2022–2028 gody* [Scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2022–2028]. (In Russ.). Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/22853> (accessed 28.09.2022).
12. *Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Murmanskoy oblasti na 2023–2027 gody* [Scheme and program for the development of the electric power industry of the Murmansk region for 2023–2027]. (In Russ.). Available at: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/> (accessed 03.10.2022).

13. *Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Respubliki Kareliya na period do 2025 goda* [Scheme and program for the perspective development of the electric power industry of the Republic of Karelia for the period up to 2025]. (In Russ.). Available at: [https://gov.karelia.ru/legal\\_acts/161619/](https://gov.karelia.ru/legal_acts/161619/) (accessed 05.10.2022).
14. *Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Respubliki Komi na 2022–2026 gody* [Scheme and program for the development of the electric power industry of the Komi Republic for 2022–2026]. (In Russ.). Available at: [https://arch.rkomi.ru/uploads/documents/noviy\\_sipr\\_utverzhdeniy\\_2022-07-05\\_18-17-53.docx](https://arch.rkomi.ru/uploads/documents/noviy_sipr_utverzhdeniy_2022-07-05_18-17-53.docx) (accessed 05.12.2022).
15. *Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Vologodskoy oblasti na 2023–2027 gody* [Scheme and program for the development of the electric power industry of the Vologda Region for 2023–2027]. (In Russ.). Available at: <http://files.ipbd.ru/files/3500202204290006.pdf> (accessed 27.12.2022).
16. Konovalova O. E. Energeticheskoe ispol'zovanie vozobnovlyaemykh rechnykh resursov Severnogo ekonomicheskogo rayona RF [Energy use of renewable river resources of the Northern economic region of the Russian Federation]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2019, Vol. 10, No. 5–18, pp. 57–69. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.5.57-69. EDN: NVFDNG.
17. Kuznetsov N. M. Drevesnye otkhody — dopolnitel'nyy istochnik energii na Severo-Zapade Rossii [Wood waste is an additional source of energy in the North-West of Russia]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2004, No. 5, pp. 119–120. (In Russ.). EDN: WFNRTD.
18. Kuznetsov N. M., Konovalova O. E. Razvitie raspredelyonnoy energetiki v Murmanskoy oblasti [Development of distributed energy in the Murmansk region]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2021, No. 5, pp. 122–127. (In Russ.). doi:10.17513/fr.43049. EDN: YCTFGP.
19. *Ob"ekty generatsii v izolirovannykh i trudnodostupnykh territoriyakh v Rossii* [Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia]. (In Russ.). Available at: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/generatsii\\_v\\_ITT.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/generatsii_v_ITT.pdf) (accessed 28.09.2022).
20. *Tarify na elektricheskuyu energiyu dlya naseleniya v regionakh Rossii v 2022 godu* [Electricity rates for the public in the regions of Russia in 2022]. (In Russ.). Available at: <https://p4energy.ru/2022/10/ee2022/> (accessed 27.04.2023).
21. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda* [Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035]. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033> (accessed 28.09.2022).

#### **Информация об авторах**

**Н. М. Кузнецов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
**О. Е. Коновалова** — инженер I категории.

#### **Information about the authors**

**N. M. Kuznetsov** — PhD (Engineering), Leading Researcher;  
**O. E. Konovalova** — Engineer of the first category.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.548 (470.21)  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.002

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Валерий Андреевич Минин<sup>1</sup>, Сергей Игоревич Кривцов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия*

<sup>1</sup>*v.minin@ksc.ru*

<sup>2</sup>*s.krivcov@ksc.ru*

### **Аннотация**

Оценено состояние теплоснабжения удалённых прибрежных потребителей Мурманской области. Предложено использование местного энергоресурса — энергии ветра, потенциал которого в прибрежных районах достаточно высок. Показано, что совместная работа котельных и ветроэнергетических установок может способствовать существенной экономии топлива и снижению себестоимости вырабатываемой тепловой энергии.

### **Ключевые слова:**

Мурманская область, прибрежные потребители, теплоснабжение, энергия ветра, ветроэнергетические установки, перспективы использования

### **Благодарности:**

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### **Для цитирования:**

Минин В. А., Кривцов С. И. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения прибрежных потребителей Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 13–28. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.002.

Original article

## **PROSPECTS FOR THE USE OF WIND ENERGY FOR HEAT SUPPLY TO COASTAL CONSUMERS OF THE MURMANSK REGION**

**Valerii A. Minin<sup>1</sup>, Sergei I. Krivtsov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia*

<sup>1</sup>*v.minin@ksc.ru*

<sup>2</sup>*s.krivcov@ksc.ru*

### **Abstract**

A state of heat supply to remote coastal consumers of the Murmansk region is estimated. This article proposes to use the local energy resource — wind energy — which has a sufficiently high potential in coastal areas. It is shown that joint operation of boiler houses and wind power plants can contribute to significant fuel savings and the reduction of the prime cost of the generated thermal energy.

### **Keywords:**

Murmansk region, coastal consumers, heat supply, wind energy, wind power plants, prospects for the use

### **Acknowledgments:**

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### **For citation:**

Minin V. A., Krivtsov S. I. Prospects for the use of wind energy for heat supply to coastal consumers of the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 13–28. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.002.

### **Введение**

В последние годы проявляется повышенный интерес к использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии [1–4] — солнечной и ветровой энергии, гидроэнергии малых рек, морских приливов, волн, течений и др. Все эти экологически чистые источники распространены на обширных территориях, и их можно рассматривать как местные энергетические ресурсы.

Использование возобновляемых источников наиболее перспективно в тех районах, где, с одной стороны, имеет место их повышенный потенциал, с другой — дефицит обычных традиционных топливных ресурсов. К числу таких районов относится Мурманская область, в которую топливо (уголь, нефтепродукты, газ, ядерное горючее) завозится из других регионов страны на расстояние 2000–3000 км и более.

Внутри Мурманской области особое внимание привлекают удалённые децентрализованные потребители, расположенные как в прибрежных, так и глубинных районах Кольского полуострова. Доставка туда затруднена, приходится использовать распределительный морской, автомобильный, бездорожный транспорт, иногда авиацию [5]. Из-за высоких транспортных расходов на топливо себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой на местных котельных, оказывается значительно выше, чем у аналогичных потребителей, расположенных в центральных районах области.

Именно применительно к удалённым децентрализованным потребителям представляется важным и актуальным изучить вопрос об использовании в прибрежных районах Баренцева и Белого морей ветровой энергии. Ветер на побережье Кольского полуострова имеет достаточно высокий потенциал, и он сам «транспортируется» к потребителю. Максимум поступления ветровой энергии имеет место в холодное время года. Это обстоятельство является важной предпосылкой для широкого практического использования ветра на нужды теплоснабжения.

### **Состояние теплоснабжения удалённых прибрежных потребителей**

В прибрежных районах Мурманской области расположено несколько десятков малых удалённых населённых пунктов [6]. В зависимости от их местонахождения, направления хозяйственной деятельности и объёмов потребления тепловой энергии можно выделить следующих характерных потребителей:

1. Прибрежные метеорологические станции и маяки (рис. 1, а, б). Для их теплоснабжения в настоящее время используются котлы производительностью до 0,02–0,03 Гкал/ч или простые огневые печи.

2. Прибрежные пограничные заставы, места базирования геологов, рыбаков, охотников, оленеводов (рис. 1, в). Для теплоснабжения этих объектов используют котельные установки мощностью 0,10–0,15 Гкал/ч на угле или жидком топливе.

3. Прибрежные объекты Северного флота России, обеспечивающие жизнедеятельность различных служб флота. Отопительная нагрузка этих объектов достигает 0,3–0,5 Гкал/ч и обеспечивается котельными установками, работающими на угле или жидком топливе.

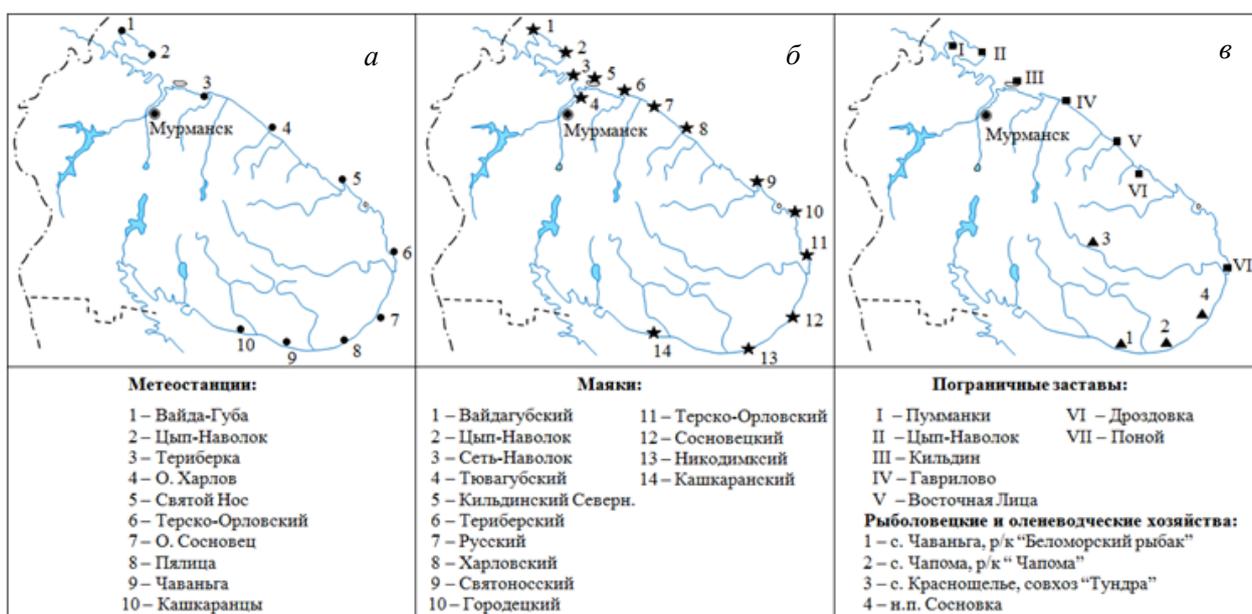
4. Рыболовецкие колхозы, крупные оленеводческие хозяйства, отдельные посёлки (рис. 1, в). Они обеспечиваются тепловой энергией от котельных установок на органическом топливе мощностью 1–2 Гкал/ч и более.

В Мурманскую область нефтепродукты, уголь, сжиженный газ и другие виды топлива доставляются по железной дороге и затем на крупных объектах теплоэнергетики топливо разгружается на топливохранилища прямо с колёс. Доставка топлива на котельные в населённые пункты, с которыми нет железнодорожного сообщения, осуществляется автомобильным, морским или бездорожным транспортом.

Перевозка топлива по морю выполняется в период летней навигации. Как правило, завозится полный запас топлива на год. При отсутствии причальных сооружений разгрузка судов производится на рейде, а затем вывоз топлива на берег осуществляется с использованием маломерного флота.

Местные перевозки топлива различными видами транспорта приводят к его существенному удорожанию: например, автомобильным транспортом — в 1,2–1,5 раза, водным морским — в 1,3–1,8 раза, бездорожным — в 1,5–2,5 раза, а при использовании авиации — в 3 раза и более по отношению к отпускной цене на опорных пунктах топливоснабжения.

Высокая стоимость топлива оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели работы теплогенерирующих установок. По этой причине в удалённых населённых пунктах довольно остро встаёт вопрос о бережном использовании ввозимого топлива и об изыскании мер по его экономии.



**Рис. 1.** Расположение автономных потребителей энергии на побережье Кольского полуострова [6]  
**Fig. 1.** The location of autonomous energy consumers on the coast of the Kola Peninsula [6]

Наряду с нефтепродуктами в удалённых населённых пунктах могут использоваться также уголь, дрова, отходы лесопиления. Удельный расход топлива на котельных установках мощностью менее 2 Гкал/ч составляет около 240–280 кг у. т./Гкал.

Число часов использования в году установленной мощности котельных зависит от их назначения и климатических условий в районе эксплуатации. В рассматриваемых районах Мурманской области этот показатель у отопительных котельных составляет 3000–3500 часов.

Объём и характер потребления энергии в мелких населённых пунктах зависит от ряда факторов: направленности хозяйственной деятельности, численности населения, климатических условий, строительно-планировочной характеристики и др.

### Технико-экономические показатели теплоснабжения малых удалённых потребителей

Для теплоснабжения малых прибрежных населённых пунктов используются котельные установки, работающие на нефтепродуктах, угле, дровах и других видах топлива.

Приведённые затраты на выработку тепловой энергии определяются выражением:

$$Z_k = S_k + E_n \cdot K_k, \quad (1)$$

где  $S_k$  и  $K_k$  — годовые эксплуатационные расходы (ежегодные издержки) и капиталовложения, руб., соответственно;  $E_n$  — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, принимаемый в энергетике равным 0,12.

Основными составляющими эксплуатационных расходов котельных являются затраты на топливо  $S_k^T$ , заработную плату  $S_k^{зп}$ , амортизацию и текущий ремонт  $S_k^{ам}$  и прочие расходы  $S_k^{пр}$ .

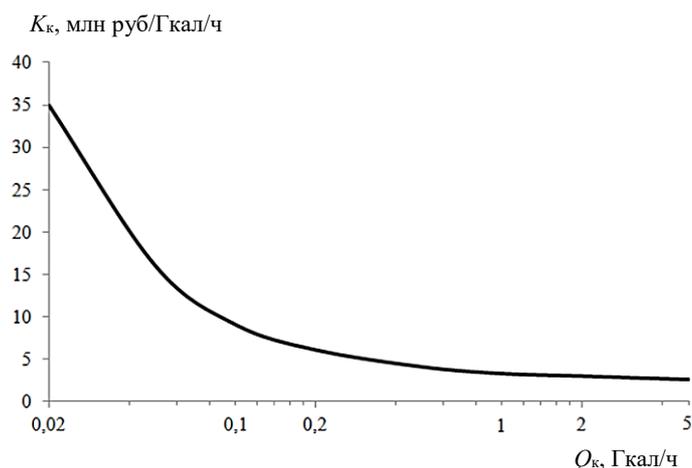
Для суммарных приведённых затрат можно записать:

$$Z_k = S_k^T + S_k^{зп} + S_k^{ам} + S_k^{пр} + E_n \cdot K_k = \frac{0,143 Q_k h_k^{max}}{\eta_k \eta_{тх}} z^T + 1,2 (p_k Q_k \Pi_k + b_k K_k) + E_n K_k, \quad (2)$$

где  $Q_k$  — установленная мощность котельной, Гкал/ч;  $h_k^{max}$  — число часов использования в году максимальной мощности котельной;  $z^T$  — стоимость топлива франко-котельная, руб/т у. т.;  $\eta_k$  — КПД котлов;  $\eta_{тх}$  — коэффициент, учитывающий потери топлива при транспортировке и хранении

(для жидкого топлива — 0,95, для угля — 0,8);  $p_k$  — штатный коэффициент, чел/Гкал;  $P_k$  — годовая заработная плата одного работника котельной, руб/(чел·год);  $b_k$  — норма амортизационных отчислений в долях от капиталовложений  $K_k$ ; 1,2 — коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов.

Тепловая нагрузка малых населённых пунктов с числом жителей до 1 000 человек обычно не превышает 3 Гкал/ч. В связи с этим рассмотрение вариантов теплоснабжения таких потребителей можно провести на примере следующего мощностного ряда котельных: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 Гкал/ч.



**Рис. 2.** Зависимость удельных капиталовложений в котельные на жидком топливе от их мощности  
**Fig. 2.** The dependence of specific investments in liquid fuel boiler houses on their capacities

Затраты на привозное топливо существенно зависят от удалённости потребителей и состояния дорожно-транспортной сети. В 2023 г., по состоянию на I квартал, цена на дизельное топливо на опорных базах топливоснабжения достигала 70 тыс. руб. за 1 т, на мазут — около 30 тыс. руб/т, на уголь — 8 тыс. руб/т. Число часов использования в году установленной мощности котельной  $h_k^{\max}$  применительно к прибрежным населённым пунктам Кольского полуострова может быть принято равным 3000–3500 часов.

Данные о КПД котлов, численности обслуживающего персонала представлены в таблице, а сведения о капиталовложениях (удельных) в котельные на жидком топливе на рис. 2. Капиталовложения в котельные на угле и дровах выросли в 1,3 и 1,8 раза

соответственно, по сравнению с котельными на жидком топливе, как это рекомендовано в работе [7].

Коэффициенты полезного действия котлов малой мощности  
и численность обслуживающего персонала котельных  
Low power boiler efficiency factors and a number of boiler house service staff

Мощность котла, Гкал/ч	КПД котлов			Численность персонала, чел.			
	Вид топлива			Мощность котельной, Гкал/ч	Вид топлива		
	дрова	уголь	жидкое топливо		уголь	жидкое топливо	дрова
0,02	0,40	0,50	0,60	Встроенные котельные			
0,05	0,45	0,50	0,60	0,02	4	3	5
0,1	0,45	0,50	0,60	0,05	5	4	7
0,2	0,50	0,55	0,65	0,10	6	4	8
0,5	0,50	0,55	0,65	Отдельно стоящие котельные			
1,0	0,55	0,60	0,70	0,5	8	6	10
2,0	0,55	0,60	0,70	1,0	9	7	12
5,0	0,60	0,65	0,75	2,0	11	8	14
				5,0	18	14	23

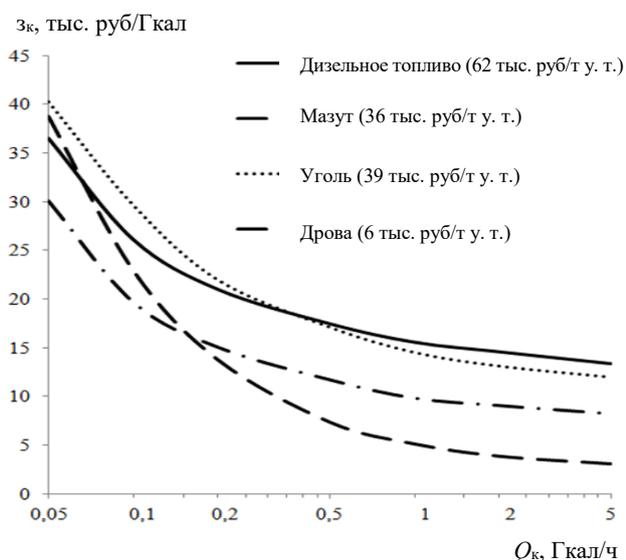
Годовая заработная плата одного работника котельной в условиях Мурманской области принималась равной 600 тыс. руб. (50 тыс. руб/мес.), норма амортизационных отчислений на мелких котельных принята равной 10 %.

Основными факторами, определяющими технико-экономические показатели работы котельных, являются их мощность и стоимость используемого топлива. Для оценки влияния этих факторов был проведен ряд расчётов при различных исходных данных.

Как отмечено выше, топливо для работы котельных в прибрежные населённые пункты Мурманской области (см. рис. 1) завозится в основном с использованием морского транспорта. Опыт такой доставки показывает, что с учётом стоимости погрузочно-разгрузочных работ и собственно перевозки (движенческой операции) топливо в итоге дорожает примерно на 20 тыс. руб/т, то есть если вблизи железной дороги цена за 1 т дистиллятного топлива составляет 60–70 тыс. руб., то после доставки в прибрежные пункты она возрастает до 80–90 тыс. руб/т или 60–65 тыс. руб/т у. т.

Выше отмечалось, что в Мурманской области уголь является самым дешёвым привозным видом топлива. Его цена после выгрузки с железной дороги составляет всего около 8 тыс. руб/т. В пересчёте на условное топливо (с учётом теплотворной способности около 5 000 ккал/кг) средняя стоимость угля получается близкой к 11 тыс. руб/т у. т. Однако нужно иметь в виду, что если затраты на перевозку 1 т груза, как отмечено выше, 20 тыс. руб., то после доставки потребителю цена 1 т угля вырастет до 28 тыс. руб. или в пересчёте на условное топливо — примерно 39 тыс. руб.

Стоимость заготовки дров в Мурманской области в среднем составляет около 1 600 руб/м<sup>3</sup>. Принимая плотность дров равной 0,7 т/м<sup>3</sup>, теплотворную способность 2500 ккал/кг, получим стоимость 1 т дров в пересчёте на условное топливо равной около 6 тыс. руб.



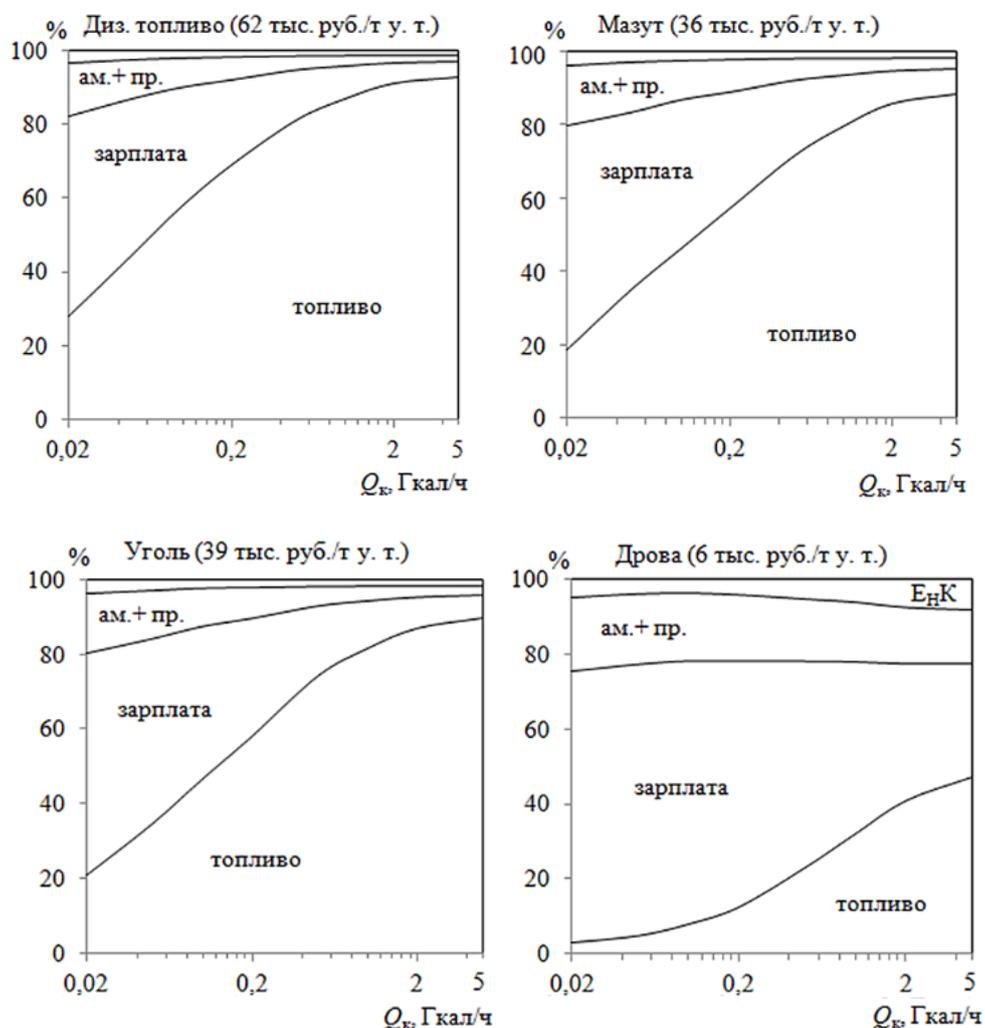
**Рис. 3.** Удельные приведенные затраты на тепловую энергию, вырабатываемую котельными в удалённых населённых пунктах  
**Fig. 3.** Specific discounted costs on thermal energy generated by boiler houses in remote settlements

его использование в удалённых населённых пунктах (по сравнению с жидким топливом) экономически не оправдывается. Целесообразность завоза и использования мазута из-за технологических трудностей с его перегрузкой (необходимостью разогрева паром) также представляется сомнительной. Заменить мазут, скорее всего, может местное древесное топливо, если существует возможность его заготовки в достаточных количествах, как, например, на южном побережье Кольского полуострова. Однако такой вариант отсутствует на северном побережье, расположенном в зоне открытой голой тундры, где альтернативы использованию жидкого топлива не имеется. Здесь, по-видимому, теплоснабжение ещё долго будет базироваться на сжигании жидкого топлива (дизельного, печного бытового, флотского мазута и др.).

На рис. 3 представлены результаты расчёта удельных приведённых затрат на тепловую энергию, вырабатываемую котельными в удалённых прибрежных населённых пунктах. В расчёте учтены изложенные выше соображения о росте стоимости различных видов топлива в ходе осуществления местных перевозок. Несмотря на то, что уголь является самым дешёвым из привозимых по железной дороге видов топлива, тем не менее применительно к удалённым прибрежным потребителям удельные приведённые затраты и себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой угольными котельными, оказываются высокими — почти такими же, как у котельных на дистиллятном топливе. Причиной тому высокие расходы на местный распределительный транспорт угля, более высокие удельные капиталовложения в котельные на угле и высокая численность обслуживающего персонала.

Из всего этого следует, что, несмотря на дешевизну угля вблизи железной дороги,

Структура затрат на выработку тепловой энергии малыми котельными представлена на рис. 4, из которого видно, что доминирующими являются затраты на топливо и заработную плату, на них приходится до 75–90 % всех расходов.

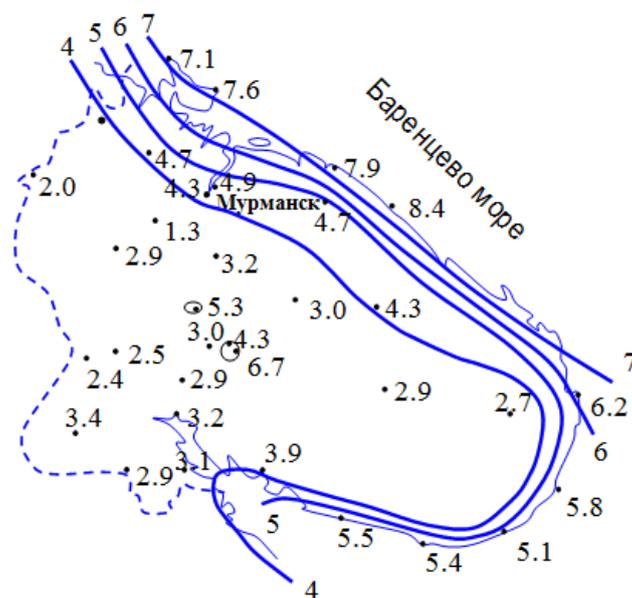


**Рис. 4.** Структура затрат на выработку тепловой энергии котельными в удалённых населённых пунктах  
**Fig. 4.** The structure of discounted costs on a generation of the thermal energy by boiler houses in remote settlements

Анализ особенностей работы малых котельных свидетельствует о необходимости улучшения показателей их работы, снижения затрат на выработку тепловой энергии. Одним из направлений повышения эффективности теплоснабжения прибрежных потребителей Кольского полуострова может быть вовлечение в оборот такого местного возобновляемого источника энергии, как ветер.

#### Потенциал ветра прибрежных районов Мурманской области

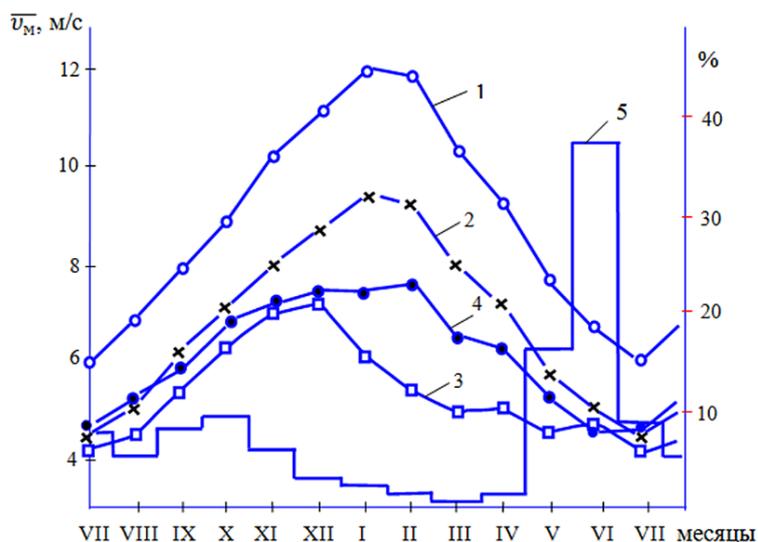
Мурманская область в основном расположена за Северным полярным кругом, что в значительной степени определяет её природно-климатические условия. Существенное влияние на климат оказывает тёплое атлантическое течение Гольфстрим, омывающее северное побережье Кольского полуострова. Оно обуславливает сравнительно мягкую продолжительную зиму и короткое прохладное лето, а соседство незамерзающего Баренцева моря с холодной сушей — повышенную интенсивность ветра. Среднегодовые скорости ветра в прибрежных районах достигают 6–8 м/с (рис. 5).



**Рис. 5.** Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли в условиях открытой ровной местности [7]

**Fig. 5.** Average multi-year wind speeds (m/s) at a 10-meter mark above the ground in a flat open-surface terrain [7]

Сезонный максимум ветра приходится на холодное время года — период с октября по апрель (рис. 6) — и совпадает с наибольшей потребностью в тепловой энергии на нужды отопления. Продолжительность отопительного сезона составляет в среднем 250–300 дней в году, достигая в отдельных пунктах побережья Баренцева моря 350 дней.



**Рис. 6.** Годовой ход среднемесячных скоростей ветра на островах (1), на побережье Баренцева (2) и Белого (3) морей, в Хибинах (4) и гидрограф рек (5) [8]:

1 — метеостанция о. Харлов; 2 — Дальние Зеленцы; 3 — Чаваньга; 4 — Центральная

**Fig. 6.** The annual course of average monthly wind speeds on the islands (1) and coast (2) of the Barents Sea, on the coast of the White Sea (3), in the Khibiny Mountains (4), and a river hydrograph (5) [8]:

1 — the weather station of Kharlov Island; 2 — Dalniye Zelentsy; 3 — Chavanga; 4 — Tsentralnaja

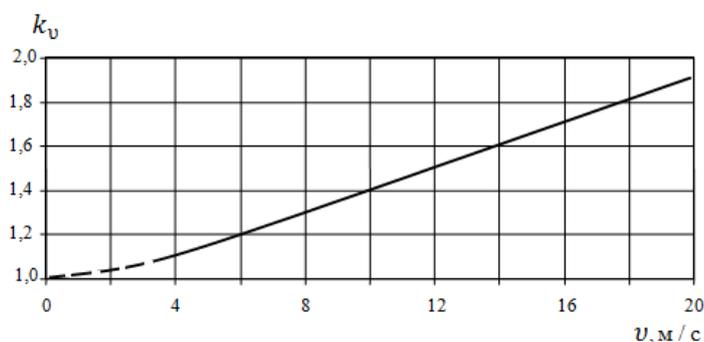
Существует ряд факторов, благоприятствующих использованию энергии ветра на нужды отопления:

1. Продолжительный отопительный сезон.
2. Повышенный потенциал ветра в зимнее время, когда потребность в тепловой энергии максимальна.

3. Ветер является вторым после наружной температуры воздуха параметром, определяющим объёмы теплопотребления. Применение ВЭУ позволяет превратить ветер из климатического фактора, определяющего повышенные теплопотери, в полноценный источник энергии, обеспечивающий именно в ветреные периоды активное поступление энергии на нужды отопления.

4. При использовании энергии ветра на нужды отопления не обязательны высокие требования к качеству энергии, вырабатываемой установкой.

5. При использовании ВЭУ для теплоснабжения не столь критичным становится основной недостаток ветровой энергии — непостоянство во времени. Кратковременные секундные и минутные изменения мощности ВЭУ сглаживаются за счёт аккумулирующей способности самой системы теплоснабжения и отапливаемых зданий. Сглаживание более продолжительных затиший возможно за счёт подключения специальных аккумулирующих устройств или дублирующих источников тепла на органическом топливе.



**Рис. 7.** Относительный рост тепловых потерь здания вследствие увеличения скорости ветра [8–10]

**Fig. 7.** The relative growth of the building heat losses from the wind speed [8–10]

от ветра (см. рис. 7);  $t_b$  и  $t_n$  — внутренняя и наружная температура воздуха, °С.

Объём и тепловая характеристика здания — величины постоянные, поэтому потребление тепла зависит только от перепада внутренней и наружной температур  $\Delta t = (t_b - t_n)$  и от поправки на ветер, учитываемой коэффициентом  $k_v$ .

Если наряду с котельной для отопления использовать ВЭУ соизмеримой мощности, то часть графика отопительной нагрузки будет покрываться от установки, а часть — от котельной. В периоды сильного ветра ВЭУ может в значительной мере или полностью обеспечить потребности в тепле, а иногда даже создать избыток энергии, зато в периоды холодной маловетреной погоды почти вся нагрузка ложится на котельную.

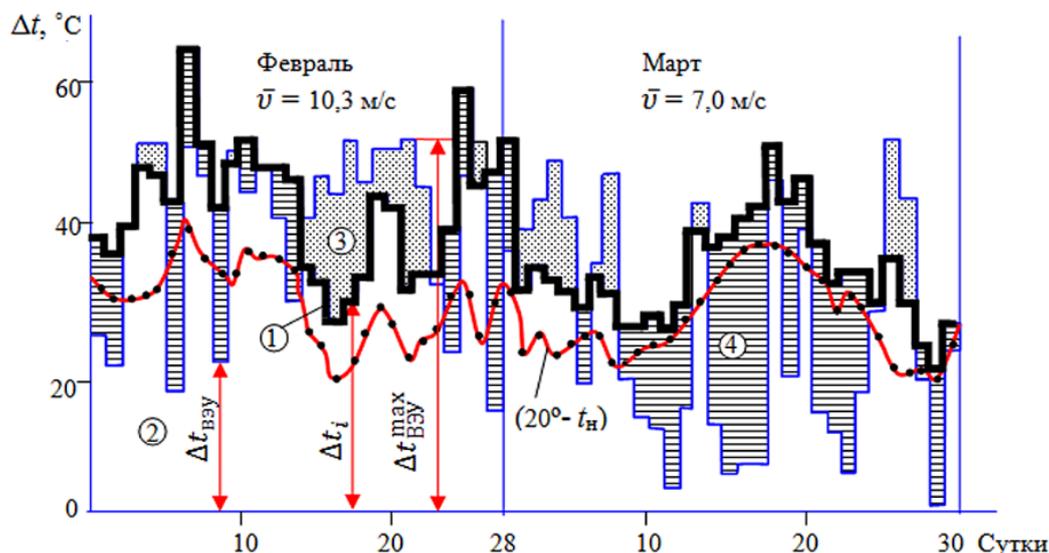
Всё сказанное можно проследить по рис. 8, на котором представлен фрагмент хронологического хода возможного участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки. Расчёты выполнены для случая, когда мощность котельной и ВЭУ равны ( $\beta^f = N_{ВЭУ}/N_k = 1$ ). Кривая с чёрными точками представляет собою график потребности в тепловой энергии при температуре  $t_b$ , равной 20 °С, и отсутствии ветра. Если учесть влияние ветра, то реальный график теплопотребления будет выше, на рисунке он обозначен утолщённой ступенчатой линией 1. На деле предложение со стороны ВЭУ редко будет точно совпадать с потребностью со стороны потребителя. Чаще либо выработка ВЭУ, отмеченная на рис. 8 позицией 2, будет превышать потребности и создавать избытки энергии (область 3), либо её будет не хватать для полного покрытия потребностей и придётся часть графика нагрузки (область 4) покрывать за счёт котельной.

На рис. 7 приведена зависимость роста тепловых потерь здания от скорости ветра, показывающая, что при высоких скоростях ветра (10–18 м/с) теплопотери возрастают в 1,4–1,8 раза.

Потребность здания в тепловой энергии определяется выражением

$$Q = qBk_v(t_b - t_n), \quad (3)$$

где  $q$  — удельная тепловая характеристика здания, ккал/м<sup>3</sup>·ч·°С;  $B$  — наружный объём отапливаемого здания, м<sup>3</sup>;  $k_v$  — коэффициент, учитывающий рост тепловых потерь



**Рис. 8.** Фрагмент хронологического хода участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки на ветроэнергетическом полигоне КНЦ РАН в пос. Дальние Зеленцы на побережье Баренцева моря: 1 — график тепловой нагрузки; 2 — полезно используемая энергия ВЭУ; 3 — избыточная энергия ВЭУ; 4 — энергия, вырабатываемая котельной

**Fig. 8.** The fragment of the chronological course of the WPP participation in covering the heating load schedule at the wind power test site of the KSC of the RAS in Dalniye Zelentsy on the coast of the Barents Sea: 1 — the thermal load schedule; 2 — the usable energy of WPP; 3 — the excess energy of WPP; 4 — the energy generated by the boiler house

### Оценка эффективности совместной работы котельной и ВЭУ

*Оценка эффективности с использованием критерия минимума приведённых затрат.* Доля  $\alpha^T$  участия ВЭУ в теплоснабжении потребителя определяется как отношение полезно использованной выработки ВЭУ, вписавшейся в график отопительной нагрузки, ко всему объёму теплопотребления. Как показано в работах [7–11], аналитически зависимость  $\alpha^T$  от режима ветра (среднегодовой скорости ветра  $\bar{v}$ ), технической характеристики ВЭУ (расчётной скорости  $v_p$ ) и мощности ВЭУ (параметра  $\beta^T$ ) аппроксимируется выражением

$$\alpha^T = 1 - \exp \left[ -3,2 \left( \frac{\bar{v}}{v_p} \right)^2 \right] \beta^T. \quad (4)$$

По аналогии с формулой (2) приведённые затраты в варианте совместной работы котельной и ВЭУ определяются выражением

$$z_{к+ВЭУ} = (1 - \alpha^T) S_k^T + 1,2(p_k N_k^{\max} \Pi_k + b_k K_k) + 1,2b_{ВЭУ} K_{ВЭУ} + E_n K_k + E_n K_{ВЭУ}, \quad (5)$$

где  $b_{ВЭУ}$  — норма амортизационных отчислений ВЭУ в долях от капиталовложений  $K_{ВЭУ}$ .

Используя показатель  $\alpha^T$  из выражения (4), для приведённых затрат в варианте совместной работы котельной и ВЭУ получим:

$$z_{к+ВЭУ} = S_k^T \exp \left[ -3,2 \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^2 \right] \beta^T + 1,2(p_k N_k^{\max} \Pi_k + b_k K_k) + (1,2b_{ВЭУ} + E_n) \beta^T N_k^{\max} \cdot 1163 k_{ВЭУ} + E_n K_k, \quad (6)$$

где  $\beta^T N_k^{\max} \cdot 1163 k_{ВЭУ} = K_{ВЭУ}$  — капиталовложения в ВЭУ.

Раскрывая величину топливной составляющей и переходя к удельным приведённым затратам, будем иметь:

$$z_{к+ВЭУ} = \frac{0,143z^T}{\eta_k \eta_{тх}} \exp \left[ -3,2 \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^{-2} \beta^T \right] + \frac{1,2}{h_k^{\max}} (p_k \Pi_k + b_k k_k) + \frac{1,2b_{ВЭУ} + E_n}{h_k^{\max}} \beta^T \cdot 1163 k_{ВЭУ} + \frac{E_n k_k}{h_k^{\max}}, \quad (7)$$

где  $k_k$  и  $k_{ВЭУ}$  — удельные капиталовложения в котельную и ВЭУ.

Полученное выражение учитывает комплекс факторов, влияющих на эффективность применения ВЭУ: режим ветра (среднегодовую скорость  $\bar{v}$ ), техническую характеристику ВЭУ (расчётную скорость ветра  $v_p$ ), число часов использования в году установленной мощности котельной  $h_k^{\max}$ , стоимость топлива  $z^T$ , удельные капиталовложения в ВЭУ  $k_{ВЭУ}$  и др.

Второе и четвёртое слагаемые выражения (7) не зависят от мощности ВЭУ (параметр  $\beta^T$ ). Первое слагаемое определяет затраты на топливо, с увеличением мощности ВЭУ эти затраты убывают. Третье слагаемое определяется величиной капиталовложений в ВЭУ. С ростом мощности установки капиталовложения увеличиваются. Минимум приведённых затрат и оптимальное  $\beta_{\text{опт}}^T$ , как было показано в [7], определяется выражением

$$\beta_{\text{опт}}^T = \frac{1}{3,2} \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^2 \ln \left[ \frac{3,2}{1,2b_{ВЭУ} + E_n} \cdot \frac{h_k^{\max} 0,143z^T}{\eta_k \eta_{тх} \cdot 1163 k_{ВЭУ} \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^2} \right]. \quad (8)$$

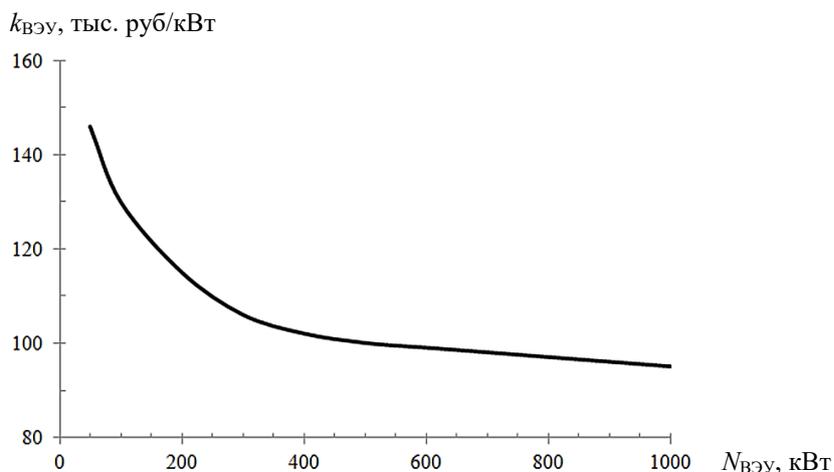
Подставляя (8) в (7), найдём минимум удельных приведённых затрат в варианте совместной работы котельной и ВЭУ:

$$z_{к+ВЭУ}^{\min} = \frac{1,2b_{ВЭУ} + E_n}{3,2} \cdot \frac{1163 k_{ВЭУ}}{h_k^{\max}} \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^2 \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{3,2}{1,2b_{ВЭУ} + E_n} \cdot \frac{h_k^{\max} 0,143z^T}{\eta_k \eta_{тх} \cdot 1163 k_{ВЭУ} \left( \frac{v_p}{\bar{v}} \right)^2} \right] \right\} + \frac{1,2}{h_k^{\max}} (p_k \Pi_k + b_k k_k) + E_n \frac{k_k}{h_k^{\max}}. \quad (9)$$

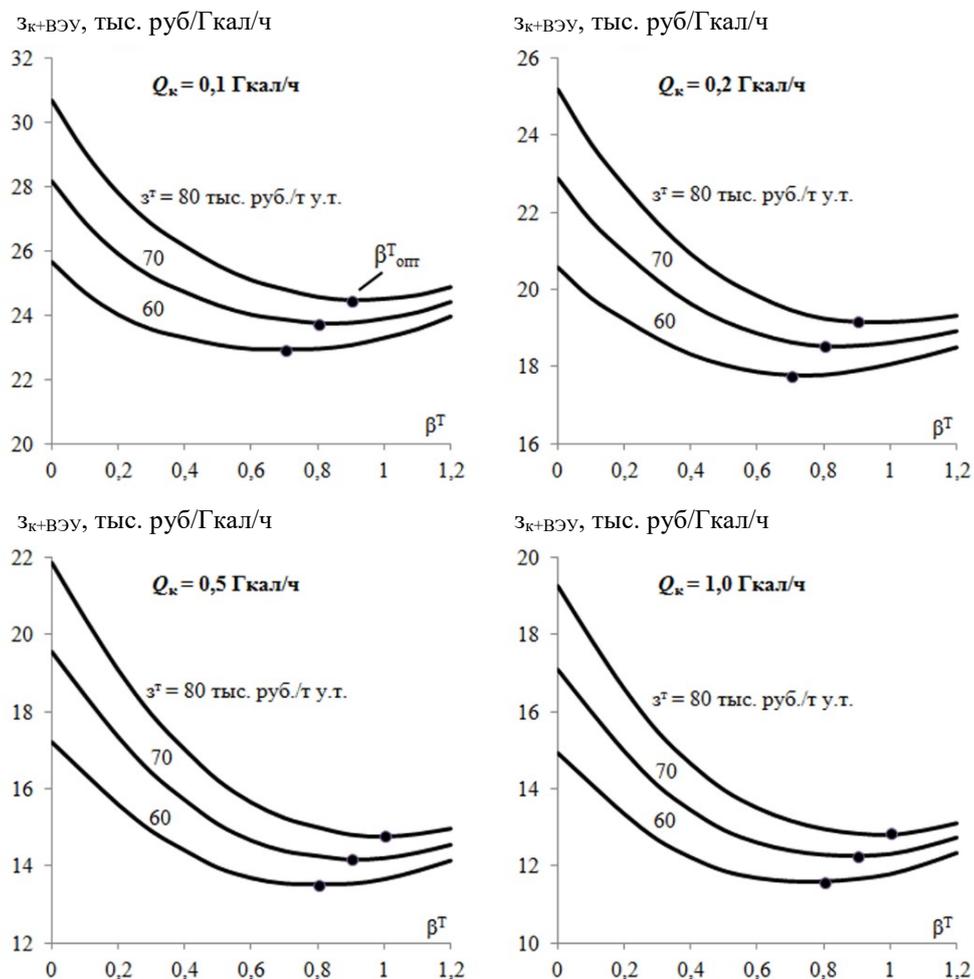
Нужно также учитывать, что удельные капиталовложения в ВЭУ  $k_{ВЭУ}$  зависят от мощности самой установки. Обзор данных, имеющихся в работе [12], позволил построить график такой зависимости (рис. 9).

На рис. 10 показана зависимость удельных приведённых затрат от параметра  $\beta^T$  при различных затратах на топливо  $z^T$ . Кривые построены для ветровых условий северного побережья Кольского полуострова (среднегодовая скорость  $\bar{v} \cong 8$  м/с; расчётная  $v_p = 1,5\bar{v}$ , удельные капиталовложения в ВЭУ принимались согласно рис. 9).

Расчёты показали, что с удорожанием топлива удельные приведённые затраты возрастают, но по мере наращивания доли ВЭУ минимум затрат смещается в область более высоких значений  $\beta^T$ , то есть в сторону более мощной ВЭУ. По сравнению с вариантом теплоснабжения только от котельной ( $\beta^T = 0$ ) внедрение ВЭУ обеспечивает снижение приведённых затрат на 10–23 % при мощности котельной 0,1–0,2 Гкал/ч и на 22–33 % при мощности котельной 0,5–1,0 Гкал/ч. Увеличение эффекта от применения ВЭУ на более мощных котельных объясняется более высокой долей топливной составляющей в структуре приведённых затрат (см. рис. 4).



**Рис. 9.** Зависимость удельных капиталовложений в ВЭУ от их мощности  
**Fig. 9.** The dependence of specific investments in WPPs on their capacities



**Рис. 10.** Удельные приведённые затраты в вариантах совместной работы котельной и ВЭУ  
**Fig. 10.** Specific discounted costs in various joint operations of the boiler house and WPP

Применительно к условиям прибрежных районов Мурманской области были проведены расчёты  $\beta_{\text{онт}}^T$  при следующих показателях:  $v_p / \bar{v} = 1,5$ ;  $h_k^{\text{max}} = 3000\text{--}3500$  — число часов использования в году максимальной мощности котельной;  $z^T = 60\text{--}80$  тыс. руб/т у. т. — удельные приведённые затраты на топливо франко-котельная;  $b_{\text{ВЭУ}} = 0,05$  — норма амортизационных отчислений; 1,2 — коэффициент, учитывающий составляющую прочих расходов;  $\eta_k = 0,7$  — КПД котельной;  $\eta_{\text{тх}} = 0,95$  — коэффициент, учитывающий потери жидкого топлива при транспортировке и хранении  $k_{\text{ВЭУ}} = 100\text{--}150$  тыс. руб/кВт — удельные капиталовложения в ВЭУ (см. рис. 9); 0,143 и 1163 — переводные коэффициенты, т у. т. / Гкал и кВт·ч/Гкал соответственно.

Расчёты показали (см. рис. 10), что при стоимости топлива 60 тыс. руб/т у. т. себестоимость тепловой энергии на котельных мощностью 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 Гкал, работающих без ВЭУ ( $\beta^T = 0$ ), составит около 26, 21, 17 и 15 тыс. руб/Гкал соответственно. Оптимальное внедрение ВЭУ, обеспечивающее минимум приведённых затрат, достигается при соотношении мощностей ВЭУ и котельной в пределах  $\beta_{\text{онт}}^T = 0,7\text{--}0,9$ .

**Оценка эффективности применения ВЭУ с использованием показателя чистого дисконтированного дохода.** В этом случае речь пойдёт об окупаемости средств, вкладываемых в сооружение ВЭУ. Если собственные средства у потребителя отсутствуют, то их придётся заимствовать в банке под определённый процент и возвращать в дальнейшем с учётом существующего уровня инфляции. В первой половине 2023 г. в Сбербанке России можно было получить кредит по заёмной ставке  $n_r = 12\text{--}13$  % годовых. Если исходить из прогноза показателя инфляции на 2023 г. в размере  $b = 5\text{--}7$  %, то так называемая реальная процентная ставка  $r$ , определяемая выражением

$$r = \frac{n_r - b}{1 + b}, \quad (10)$$

составит около 7 %.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется как сумма текущих доходов за весь расчётный период, приведённая к начальному шагу:

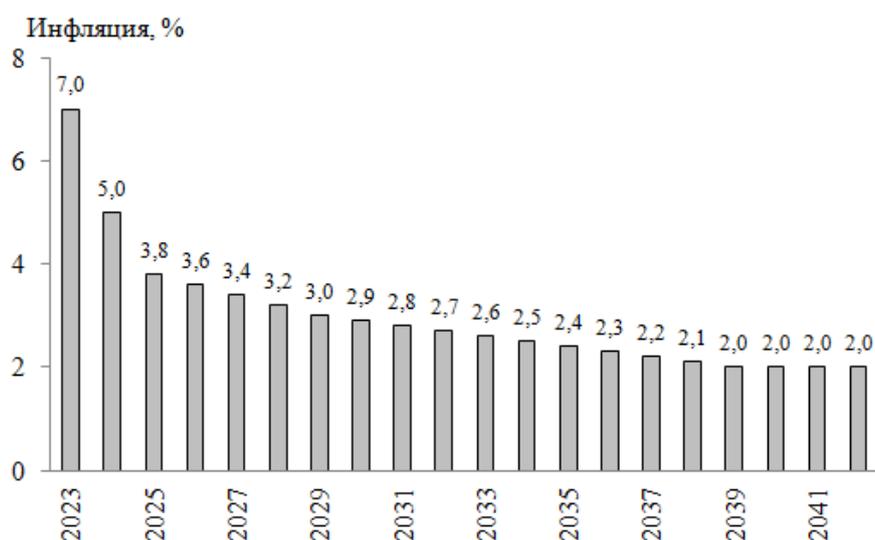
$$\text{ЧДД} = \left[ \frac{B_1}{1+r} + \frac{B_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+r)^n} \right] - I_0, \quad (11)$$

где  $B_1, B_2, \dots, B_n$  — текущий эффект (доход) от работы ВЭУ за соответствующий год (с года 1-го до года  $n$ -го) в течение всего срока службы  $n$ ;  $r$  — реальная процентная ставка;  $I_0$  — инвестиции в сооружение объекта.

Положительный результат расчёта по выражению (11) свидетельствует об эффективности предлагаемого объекта, то есть инвестор в течение срока эксплуатации ВЭУ получит прибыль. Чем больше прибыль, тем выгоднее объект. При отрицательном результате расчёта инвестор потерпит убытки. В вариантах совместной работы котельной и ВЭУ прибыль зависит от ветровых условий, в которых работает ВЭУ, стоимости топлива, затрат в сооружении ВЭУ и от тарифа, по которому вырабатываемая тепловая энергия может быть реализована.

Как было отмечено выше, в 2023 г. заимствование средств в банке возможно под 12–13 % годовых. Инфляция в 2022 г. составляла около 11,9 %. По прогнозам Банка России и Министерства экономического развития, ожидается, что в 2023 г. инфляция снизится до 6–7 %, а в 2024 г. — до 4–5 %. Благодаря этому есть основания полагать, что в дальнейшем её удастся снизить до 2–3 %. В целом за 20-летний период (ожидаемый срок службы ВЭУ) изменение инфляции может выглядеть так, как показано на рис. 11. Вслед за снижением инфляции будет уменьшаться и процентная заёмная ставка по кредитам, при этом реальная процентная ставка (ставка дисконтирования), согласно выражению (10), сохранится на уровне около 7 %.

При расчёте ЧДД будем исходить из того, что доля  $\alpha^T$  участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки зависит от соотношения мощностей ВЭУ и котельной (параметра  $\beta^T = N_{ВЭУ}/N_k$ ), режима ветра (соотношения расчётной скорости ветра  $v_p$ , определяющей номинальную мощность ВЭУ, и среднегодовой скорости  $\bar{v}$  на высоте оси ветроколеса) и определяется аналитически выражением (4). Будем также предполагать, что тариф на тепловую энергию, заработная плата обслуживающего персонала и стоимость топлива изменяются (возрастают) в соответствии с предполагаемым уровнем инфляции (рис. 11).



**Рис. 11.** Предполагаемое изменение уровня инфляции в России на перспективу 20 лет  
**Fig. 11.** The expected change in the inflation rate in Russia for the next 20 years

Эффект от применения в  $i$ -м году комплекса «котельная + ВЭУ» определится как разница между доходом от реализованной по тарифу  $f_i$  тепловой энергии и расходами на зарплату, топливо и прочие расходы:

$$B_i = Wf_i - \left( 1,2 p_k N_k \Pi_{k_i} + \frac{W(1 - \alpha^T) 0,143 z_i^T}{\eta_k \eta_{тх}} \right), \quad (12)$$

где  $W = N_k h_k^{\max}$  — годовое потребление энергии, Гкал;  $p_k$  — штатный коэффициент на котельной, чел/Гкал/ч;  $N_k$  — мощность котельной, Гкал/ч;  $\Pi_{k_i}$  — годовая заработная плата в  $i$ -м году, руб.; 1,2 — коэффициент, учитывающий долю прочих расходов;  $z_i^T$  — стоимость топлива в  $i$ -м году, руб/т у. т.;  $\eta_k$  — КПД котельной;  $\eta_{тх} = 0,95$  — коэффициент, учитывающий потери топлива при транспортировке и хранении.

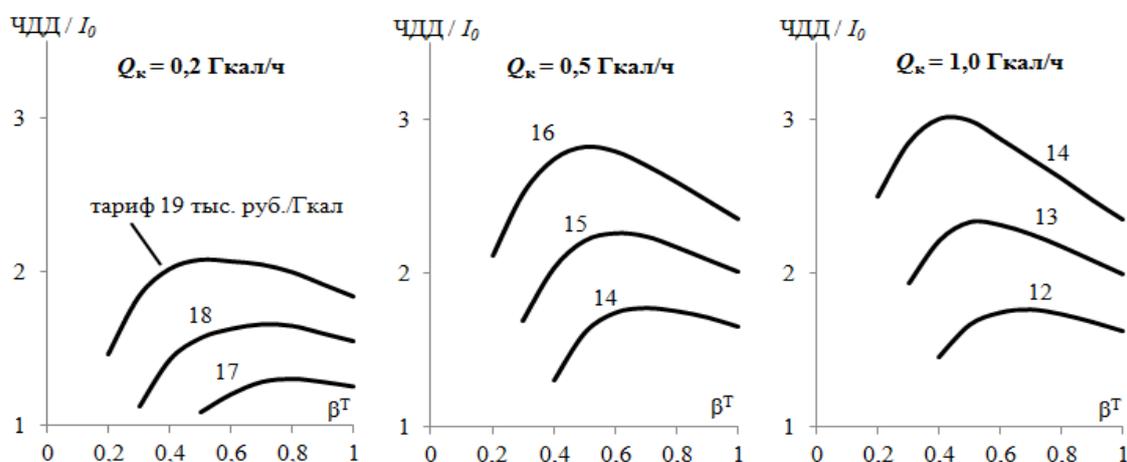
Инвестиционные затраты в сооружение комплекса «котельная + ВЭУ» определяются их удельными капиталовложениями и мощностями:

$$I_0 = k_k N_k + k_{ВЭУ} N_{ВЭУ}. \quad (13)$$

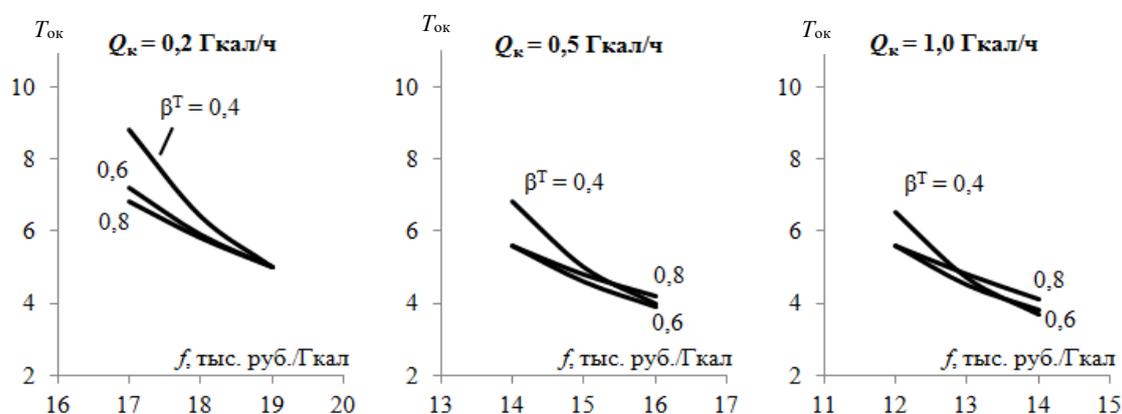
Были проведены расчёты по определению чистого дисконтированного дохода и инвестиционных затрат, необходимых для организации совместной работы котельной и ВЭУ. Зависимости соотношения доходов (ЧДД) и инвестиций  $I_0$  от параметра  $\beta^T$  представлены на рис. 12.

Расчёты показали, что при реализации тепла по тарифу 12–19 тыс. руб/Гкал (что ниже, чем при теплоснабжении только от котельной, см. рис. 10) сроки окупаемости капиталовложений в котельную и ВЭУ составят от 4 до 8 лет (рис. 13). При этом доход на каждый рубль инвестиций,

вложенный в котельную и ВЭУ, достигает максимума при  $\beta_{\text{отт}}^T = 0,5-0,8$  (рис. 12). Это согласуется с аналогичными показателями, полученными ранее при использовании критерия минимума приведённых затрат.



**Рис. 12.** Зависимость чистого дисконтированного дохода, приходящегося на каждый рубль инвестиций в комплекс «котельная + ВЭУ», от соотношения мощностей ВЭУ и котельной  
**Fig. 12.** The dependence of net present value earned for each ruble of investments to the complex “boiler house + WPP” on capacity ratio of WPP and the boiler house



**Рис. 13.** Зависимость срока окупаемости комплекса «котельная + ВЭУ» от тарифа на отпускаемую тепловую энергию  
**Fig. 13.** The dependence of the payback period of the complex “boiler house + WPP” on the released thermal energy rate

## Выводы

1. В удалённых прибрежных районах Мурманской области имеется несколько десятков удалённых населённых пунктов и отдельных объектов, теплоснабжение которых осуществляется от местных котельных установок. На котельных используется привозное топливо (нефтепродукты, уголь, дрова и др.), доставка, которого сопряжена с большими транспортными расходами, что обуславливает высокую себестоимость вырабатываемой тепловой энергии (15–30 тыс. руб./Гкал).

2. Прибрежные районы Баренцева и Белого морей располагают повышенным потенциалом ветра. Среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют 5–7 м/с. Сезонный максимум скоростей ветра совпадает с максимумом потребности в тепловой энергии со стороны потребителей. В этом заключаются основные предпосылки для использования ветровой энергии на нужды теплоснабжения.

3. Совместная работа котельных и ветроэнергетических установок (ВЭУ) способна обеспечить экономию топлива на котельных на 20–30 % и снизить себестоимость вырабатываемой тепловой энергии.

4. Оптимальное соотношение мощностей ВЭУ и котельной, обеспечивающее наибольшую выгоду от использования энергии ветра, составляет 0,7–0,9.

#### Список источников

1. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких [и др.]; под ред. П. П. Безруких. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
2. Концепция использования ветровой энергии в России / под ред. П. П. Безруких. М.: Книга — Пента, 2005. 128 с.
3. Зубарев В. В., Минин В. А., Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.
4. Marchenko O. V., Solomin S. V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in Northern regions of Russia // *Renewable Energy*. 2004. Vol. 29, No. 11. P. 1793–1809.
5. Минин В. А. Экономические аспекты развития возобновляемой энергетики малой мощности в удалённых поселениях на Кольском полуострове. Мурманск: Bellona, 2011. 44 с.
6. 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. doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84.
7. Минин В. А., Бежан А. В. Перспективы использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Европейского Севера. Апатиты: КНИЦ РАН, 2009. 56 с.
8. Энергия ветра — перспективный возобновляемый энергоресурс Мурманской области: препринт / В. А. Минин [и др.]. Апатиты: КНИЦ РАН, 2006. 73 с.
9. Минин В. А. Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения потребителей Севера // *Теплоэнергетика*. 2009. № 11. С. 34–40.
10. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова. Мурманск: Bellona, 2005. 51 с.
11. Минин В. А., Дмитриев Г. С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Bellona, 2007. 92 с.
12. Ветроэлектростанции // *Energystock*. URL: <https://energystock.ru/vetrogenerator/vetrovye-elektrostantsii> (дата обращения: 10.03.2023).

#### References

1. Bezrukikh P. P., Arbuzov Yu. D., Borisov G. A., Vissarionov V. I., Evdokimov V. M., Malinin N. K., Ogorodov N. V., Puzakov V. N., Sidorenko G. I., Shpak A. A. *Resursy i effektivnost' ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii v Rossii* [Resources and efficiency of the use of renewable energy sources in Russia]. Saint Petersburg, Nauka, 2002, 314 p.
2. *Kontseptsiya ispol'zovaniya vetrovoy energii v Rossii* [The concept of the use of wind energy in Russia]. Moscow, Kniga — Penta, 2005, 128 p.
3. Zubarev V. V., Minin V. A., Stepanov I. R. *Ispol'zovanie energii vetra v rayonakh Severa* [The use of wind energy in the North]. Leningrad, Nauka, 1989, 208 p.
4. Marchenko O. V., Solomin S. V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in Northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, Vol. 29, No. 11, pp. 1793–1809.
5. Minin V. A. *Ekonomicheskie aspekty razvitiya vozobnovlyaemoy energetiki maloy moshchnosti v udalennykh poseleniyakh na Kol'skom poluostrove* [Economic aspects of the development of low-power renewable energy in remote settlements on the Kola Peninsula]. Murmansk, Bellona, 2011, 44 p.
6. Minin V. A., Tselishcheva M. A. *Resursy vetra zapadnogo sektora Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i vozmozhnye napravleniya ikh ispol'zovaniya* [Wind resources of the Western sector of the Arctic zone of Russian Federation and possible areas of their use]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*

- [Arctic: Ecology and Economy], 2023, Vol. 13, No. 1, pp. 72–84. (In Russ.). doi:10.25283/2223-4594-2023-1-72-84.
7. Minin V. A., Bezhan A. V. *Perspektivy ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley evropeyskogo Severa* [The prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers of the European North]. Apatity, KSC RAS, 2009, 56 p.
  8. Minin V. A., Dmitriev G. S., Ivanova E. A., Moroshkina T. N., Nikiforova G. V., Bezhan A. V. *Energiya vetra — perspektivnyy vozobnovlyаемый energoresurs Murmanskoy oblasti* [Wind energy is a promising renewable energy resource of the Murmansk region]. Apatity, KSC RAS, 2006, 73 p.
  9. Minin V. A. Otsenka perspektiv ispol'zovaniya energii vetra dlya teplosnabzheniya potrebiteley Severa [Assessment of the prospects for the use of wind energy for heat supply to consumers of the North]. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2009, No. 11, pp. 34–40. (In Russ.).
  10. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Perspektivy osvoeniya resursov vetrovoy energii Kol'skogo poluostrova* [Prospects for the development of wind energy resources of the Kola Peninsula]. Murmansk, Bellona, 2005, 51 p.
  11. Minin V. A., Dmitriev G. S. *Perspektivy osvoeniya netraditsionnykh i vozobnovlyаемых istochnikov energii na Kol'skom poluostrove* [Prospects for the development of unconventional and renewable energy sources on the Kola Peninsula]. Murmansk, Bellona, 2007, 92 p.
  12. *Vetroelektrostantsii*. Energystock. Available at: <https://energystock.ru/vetrogeneratory/vetrovye-elektrostantsii> (accessed 10.03.2023). (In Russ.).

#### ***Информация об авторах***

**В. А. Минин** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией;  
**С. И. Кривцов** — инженер.

#### ***Information about the authors***

**V. A. Minin** — PhD (Engineering), Head of Laboratory;  
**S. I. Krivtsov** — Engineer

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.365.22  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003

## **ОСОБЕННОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КАК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Елизавета Игоревна Губская**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия, e.gubskaya@ksc.ru*

### **Аннотация**

Дуговая сталеплавильная печь является одним из типовых промышленных потребителей электроэнергии, работа которого оказывает значительное негативное влияние на системы электроснабжения. Главным образом это связано с рядом особенностей технологического процесса плавки. В статье представлено краткое описание устройства и принципа работы электропечи. Приведены схема электроснабжения печи и специфические условия функционирования применяемого электрооборудования. Рассмотрены основные искажения качества электроэнергии в сетях, питающих дуговые электропечи, и показаны причины их возникновения.

### **Ключевые слова:**

дуговая сталеплавильная печь, системы электроснабжения, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии

### **Благодарности:**

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### **Для цитирования:**

Губская Е. И. Особенности дуговых сталеплавильных печей как потребителей электроэнергии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 29–38. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003.

Original article

## **FEATURES OF ELECTRIC ARC FURNACES AS CONSUMERS OF ELECTRICAL ENERGY**

**Elizaveta I. Gubskaya**

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia, e.gubskaya@ksc.ru*

### **Abstract**

An electric arc furnace is one of the typical industrial consumers of electrical energy, having a significant negative impact on power supply systems. This is mainly due to a number of specific features of the melting process. The article presents a brief description of the structure and principle of furnace operation. The scheme of electric power supply of the furnace and the specific conditions of functioning of the electrical equipment used are given. The main power quality distortions in the networks supplying electric arc furnaces are considered, and the causes of these disturbances are shown.

### **Keywords:**

electric arc furnace, power supply systems, electromagnetic compatibility, power quality

### **Acknowledgments:**

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### **For citation:**

Gubskaya E. I. Features of electric arc furnaces as consumers of electrical energy // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 29–38. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003.

### **Введение**

Дуговая электрическая печь является энергоемкой электротехнической установкой, в которой плавление металлов и других материалов осуществляется за счет теплового эффекта электрической дуги. В настоящее время такие печи широко применяются в металлургии, машиностроении, химической и других отраслях промышленности.

Поскольку в процессе электроплавки точно регулируется температура металла и содержание в нем примесей и, следовательно, возможно получать сплавы практически любого состава, дуговые электропечи используются в первую очередь в производстве сталей.

В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) выплавляют высоколегированные инструментальные стали, жаропрочные и жаростойкие, нержавеющие стали, подшипниковые, а также многие другие конструкционные стали, производство которых с помощью конвертера и мартеновской печи сопряжено с рядом трудностей [1].

Преимущество ДСП относительно других сталеплавильных агрегатов обусловлено следующим:

- отсутствие высоких требований к качеству шихтовых материалов (содержанию примесей в ломе);
- возможность введения в печь большого количества легирующих элементов за счет быстрого нагрева металла;
- точная и плавная регулировка температуры сплава;
- обеспечение низкого содержания серы, фосфора и неметаллических включений в составе сплавов;
- малые потери легирующих элементов в результате окисления за счет возможности регулирования окислительно-восстановительных свойств среды в процессе плавки, а также обеспечения в печи восстановительной атмосферы и безокислительных шлаков.

Применение ДСП, тем не менее, имеет ряд недостатков, к которым относят:

- трудность перемешивания металла, что в некоторой степени препятствует усреднению его температуры и химического состава;
- выделение значительного количества продуктов горения и производство шума во время работы [2, 3].

С позиции осуществления электропитания дуговая сталеплавильная печь является проблемным энергопотребителем, поскольку необходимо обеспечить согласование параметров печи и питающей сети, а также сглаживание значительных возмущений, возникающих в сети в процессе плавки. Негативное воздействие ДСП на системы электроснабжения обусловлено главным образом принципом действия установки и специфическими условиями ее работы.

### **Принцип работы дуговых электропечей**

Различают два основных вида дуговых электропечей: печи прямого действия (нагрева), в которых электрическая дуга горит между электродом и расплавляемым металлом, при этом энергия дуги передается металлу непосредственно, и печи косвенного действия (нагрева), в которых дуга горит между двумя электродами над поверхностью металла, теплопередача при этом осуществляется излучением и конвекцией.

Для плавки стали применяются электропечи прямого нагрева, к которым относятся печи переменного тока и печи постоянного тока.

В печах первого типа трехфазный переменный ток промышленной частоты (50 Гц) подается в плавильное пространство через три электрода. Когда электроды, на которые подано напряжение, опущены вниз и кратковременно соприкасаются с загруженным в печь металлом, возникает короткое замыкание. В этот момент в электрической цепи протекает ток большой силы. Затем электроды немного приподнимаются, в результате между ними и верхним слоем шихты возникают электрические дуги. Аналогичным образом возникают электрические дуги в дуговых печах постоянного тока. В качестве катода выступает единственный электрод. Анод расположен в подине печи и находится в непосредственном контакте с расплавляемым металлом [4].

Применение печей постоянного тока, несмотря на ряд имеющихся преимуществ, которые подробно описаны в работе [5], сопровождается существенными затратами на установку тиристорного преобразователя, предназначенного для выпрямления переменного тока в постоянный, а также, как следствие, дополнительными затратами на необходимое удлинение короткой сети печи и усложнение системы охлаждения. При этом использование постоянного тока не обеспечивает повышения производительности печи относительно использования переменного. В связи с этим наибольшее

распространение в сталеплавильном производстве получили печи переменного тока. Именно этого типа дуговые электропечи рассматриваются в данной статье.

### Устройство дуговых сталеплавильных печей

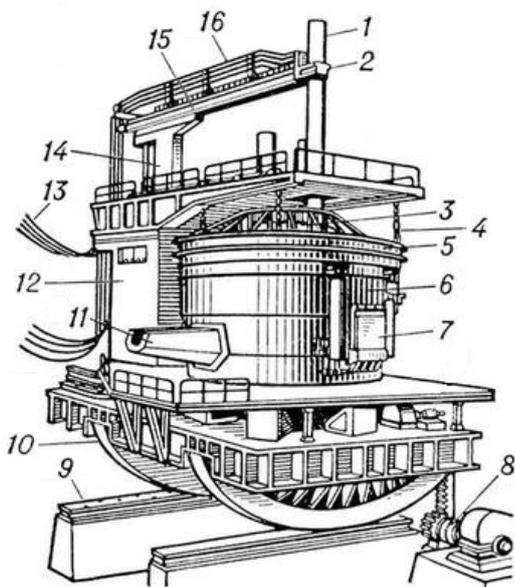
В общем виде устройство ДСП показано на рис. 1. Плавильное пространство электропечи заключено в железный цилиндрический кожух со сферическим днищем, который имеет внутри огнеупорную футеровку и закрывается съемный сводом, подвешенным на цепях. Емкость отечественных ДСП варьируется от 0,5 до 200 т и указывается в обозначении печи (например, ДСП-6).

Загруженные в электропечь шихтовые материалы нагреваются и плавятся, как было описано выше, под воздействием мощных электрических дуг, горящих между концами трех электродов и шихтой, находящимися в печи. Электроды помещаются в плавильное пространство через три отверстия, имеющих в кладке свода. Зажим электродов и подвод к ним электрического тока обеспечивается электрододержателем, который крепится на металлическом рукаве. Перемещение электродов в вертикальном направлении обеспечивает Г-образная подвижная стойка, которая скреплена с металлическим рукавом в единую жесткую конструкцию.

Легирующие элементы подгружаются через рабочее окно в кожухе, которое предназначено также для качивания шлака, проведения осмотра, заправки, ремонта и загрузки шихты в печи малой емкости.

Слив выплавленного металла осуществляется через выпускное отверстие со сливным желобом. Для наклона печи в процессе слива и для опоры ее корпуса на фундамент служит люлька с двумя опорными сегментами, которые перекачиваются по станине. Наклоняется печь с помощью реечного механизма.

Загрузка ДСП осуществляется после предварительного поднятия свода к порталу, который затем отворачивается (со сводом и электродной группой) в сторону сливного желоба [6].



**Рис. 1.** Общий вид дуговой сталеплавильной печи:

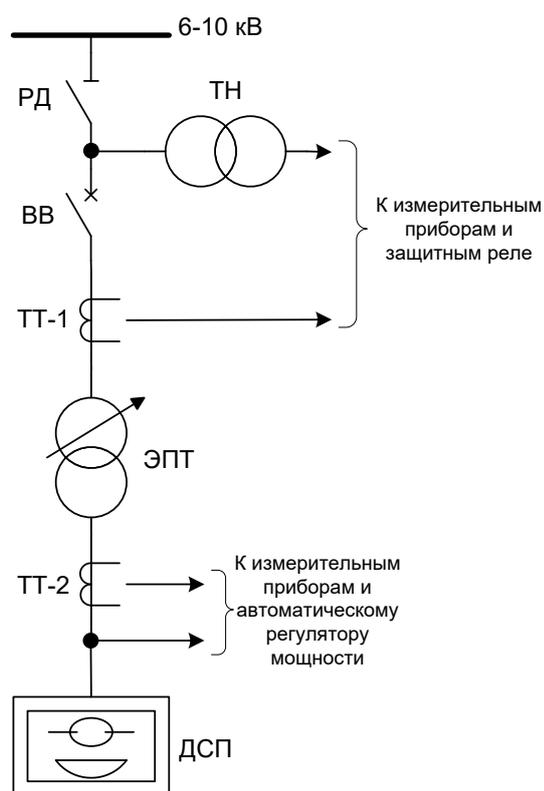
1 — электрод; 2 — электрододержатель; 3 — свод; 4 — подвеска свода; 5 — сводное кольцо; 6 — цилиндрический кожух; 7 — дверца рабочего окна; 8 — механизм наклона печи; 9 — станина; 10 — люлька; 11 — сливной носок; 12 — портал; 13 — гибкий токопровод; 14 — стойка электрододержателя; 15 — рукав электрододержателя; 16 — трубошины токопровода [6]

**Fig. 1.** Layout of an electric arc furnace:

1 — electrode; 2 — electrode holder; 3 — roof; 4 — roof suspension; 5 — roof ring; 6 — furnace shell; 7 — slag door; 8 — mechanism of furnace tilt; 9 — rocker rail; 10 — rocker; 11 — pouring spout; 12 — roof removal jib structure; 13 — power cables; 14 — rack of electrode holder; 15 — power conducting arm; 16 — bus tubes [6]

### Электроснабжение дуговых сталеплавильных печей

В нормальном режиме питание маломощной ДСП (или группы маломощных ДСП) производится от расщепленной обмотки силового трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) или от отдельного трансформатора. В первом случае к системе сборных шин 6–10 кВ ГПП печь (группа печей) подключается по двухступенчатой радиальной схеме, которая предполагает наличие дополнительной распределительной подстанции 6–10 кВ. На предприятиях с ДСП высокой мощности



**Рис. 2.** Принципиальная схема электропитания дуговой сталеплавильной печи

**Fig. 2.** Diagram of an electric arc furnace power supply

обеспечивает возможность регулирования и стабилизации электрического режима ДСП за счет непрерывного и плавного изменения длин горящих дуг и, следовательно, токов фаз печи путем подъема и опускания электродов.

Ввиду особенностей технологического процесса электроплавки стали электрооборудование ДСП работает в более тяжелых условиях, чем оборудование общепромышленных электроустановок. Эти особенности включают, во-первых, многократные короткие замыкания (к. з.) электродов на расплавляемый металл, которые являются нормальным эксплуатационным явлением, во-вторых, высокие рабочие токи, сила которых достигает десятки тысяч ампер, что обусловлено низким напряжением горения дуг при высокой мощности печи, и, в-третьих, широкие пределы изменения мощности печи и подаваемого на нее напряжения на разных этапах плавки и в зависимости от марки выплавляемой стали.

Таким образом, электрооборудование, применяемое в установках ДСП, рассчитано для работы в условиях многочисленных перегрузок по току вследствие эксплуатационных к. з. и значительных перенапряжений, которые могут быть вызваны частыми колебаниями тока и коммутациями. В связи с этим электропечные трансформаторы имеют усиленную конструкцию, которая позволяет выдерживать возникающие при к. з. механические усилия, а также дополнительный нагрев обмоток, обусловленный толчкообразным режимом работы.

Ограничение толчков тока при эксплуатационных к. з. приемлемыми для нормального функционирования электрооборудования значениями, а также устойчивость горения электрических дуг достигается за счет включения реактора (дополнительной индуктивности) последовательно с печным трансформатором со стороны высшего напряжения. Это мероприятие является необходимым для малых ДСП емкостью до 12 т с трансформаторами мощностью до 9 МВА. В случае использования

может быть организована локальная питающая сеть 35 кВ. Некоторые крупные ДСП получают питание от систем шин 110 кВ [7].

На рис. 2 приведена упрощенная схема электропитания дуговых электропечей от сети 6–10 кВ. Поскольку рабочее напряжение печи составляет 100–800 В и изменяется в указанном диапазоне в зависимости от периода плавки и марки изготавливаемой стали, каждая ДСП снабжается электропечным понижающим трансформатором со ступенчатым регулированием вторичного напряжения (ЭПТ). Переключение обмоток, а следовательно, и регулирование напряжения осуществляется под нагрузкой.

Трансформатор подключается к сборным шинам распределительного устройства через разъединитель (РД) и автоматический вакуумный выключатель (ВВ) с трансформаторами тока (ТТ-1). В электрооборудование ДСП, помимо печного трансформатора и коммутационной аппаратуры, входят защитные реле, а также различная измерительная аппаратура, присоединяемая к сети через трансформаторы тока (ТТ-1 и ТТ-2) или напряжения (ТН). Здесь же необходимо указать быстродействующую систему автоматического регулирования процесса плавки. Данная система, наряду с переключением ступеней низшего напряжения электропечного трансформатора,

печей большей мощности достаточной и даже избыточной является индуктивность электропечного трансформатора и короткой сети [8].

Защиту от перегрузок обеспечивают реле максимального тока, от аварийных к. з. — реле мгновенного действия, при этом уставка последнего выбирается так, чтобы отсутствовал отклик на эксплуатационные к. з., которые устраняются поднятием электродов [9].

Подводя итог приведенному выше краткому описанию особенностей процесса электроплавки и работы печного электрооборудования, можем дать следующую характеристику ДСП как потребителя электроэнергии:

1. Установка работает с низким коэффициентом мощности, который обусловлен высокой индуктивностью печного трансформатора и токоподводов.

2. Нагрузка электропечи является нелинейной вследствие нелинейности сопротивления электрических дуг и резкопеременной, так как во время работы изменяется мощность печи и возникают частые толчки тока.

3. ДСП отличается беспокойным режимом работы, особенно на начальной стадии плавки (этапе расплавления), что обусловлено многократными к. з. электродов на металл, а также неустойчивостью и обрывами дуг.

В совокупности эти факторы определяют ДСП как мощный источник возмущений, оказывающих негативное влияние на питающую сеть, что выражается в нарушении условий электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования системы электроснабжения.

### **Влияние дуговых сталеплавильных печей на качество электроэнергии в системах электроснабжения**

С точки зрения надежного функционирования систем электроснабжения ЭМС электроприемников имеет весомое практическое значение. И поскольку дуговые электропечи являются одной из типовых специфических нагрузок в сетях промышленных предприятий, вопросу отрицательного влияния ДСП на других потребителей уделяется значительное внимание [10–20].

Контроль соблюдения условий обеспечения ЭМС в сетях, питающих дуговые сталеплавильные печи, осуществляется посредством проведения анализа качества электрической энергии, который заключается в установлении степени соответствия совокупности определенных параметров, характеризующих электрическую энергию (напряжение, номинальное значение частоты, форма кривой напряжения и др.), действующих в РФ стандартам [21–24]. Для определения отклонений этих параметров от значений, регламентированных требованиями ГОСТ, производят мониторинговые регистрации показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

Согласно результатам исследований, опубликованных в источниках [25–27], в сетях, обеспечивающих электропитание ДСП, наблюдается существенное несоответствие значений ПКЭ установленным нормам. В наибольшей мере проявляются такие искажения, как несинусоидальность и несимметрия напряжений и токов, а также отклонения, провалы и колебания напряжения.

Причиной искажения синусоидальной формы кривых напряжения и тока являются высшие гармоники, генерация в питающую сеть которых связана с задержкой зажигания дуг и нелинейностью их вольт-амперной характеристики [28]. Электрические дуги, кроме того, горят во время работы печи несимметрично, вследствие чего нагрузка ДСП распределяется по фазам неравномерно, вызывая тем самым перекося фаз. Следует отметить, что наибольшие значения коэффициента несимметрии напряжений фиксируются при осуществлении питания ДСП от сетей 6–10 кВ [26].

Отклонения, провалы и значительные колебания напряжения являются следствием колебаний нагрузки электропечи (в особенности потребляемой реактивной мощности), а также колебаний токов дуг при эксплуатационных коротких замыканиях [29]. При этом указанные возмущения, как правило, регистрируются не только на питающей ДСП секции шин, но и на других связанных с ней секциях шин системы электроснабжения. Колебания напряжения, в свою очередь, обуславливают появление фликера, что оказывает неблагоприятное воздействие на электронную технику и осветительные приборы, особенно лампы накаливания [30].

Важно подчеркнуть, что возникновение перечисленных выше искажений наиболее характерно для этапа расплавления металла и начала этапа окисления, поскольку именно в эти периоды плавки нагрузка печи изменяется наиболее резко. На стадии рафинирования электрические дуги горят более равномерно, что приводит к снижению негативного влияния нагрузки ДСП на системы электроснабжения.

Таким образом, работа дуговых сталеплавильных печей вносит значимый вклад в снижение качества электроэнергии в питающих сетях предприятий, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на функционировании других электроприемников, приводит к сбою или отказу систем автоматики и релейной защиты, а также существенно увеличивает потери электроэнергии.

## **Заключение**

Дуговая сталеплавильная печь является одним из наиболее распространенных промышленных потребителей электрической энергии, нагрузка которого носит нелинейный резкопеременный характер, что обусловлено специфическими условиями работы установки. Из-за особенностей технологического процесса плавки ДСП является источником мощных электромагнитных помех, оказывая тем самым неблагоприятное влияние на потребителей, которые получают питание от той же сети. Другими словами, работа ДСП вызывает нарушение условий электромагнитной совместимости оборудования систем электроснабжения.

Соблюдение ЭМС технических средств является значимым аспектом обеспечения устойчивости и безопасности электроэнергетических систем, поскольку предупреждает возникновение серьезных сбоев в работе электрооборудования и аварийных режимов сети. В связи с этим проблема обеспечения ЭМС дуговых электропечей и систем электроснабжения имеет решающее значение при проектировании питающих сетей предприятий. Также очень важно учитывать то, что искажения, вносимые работой ДСП, носят случайный характер и некоторые из них являются быстрыми процессами. Поэтому усреднение произведенных измерений ПКЭ, согласно регламентированной методике, может не в полной мере охарактеризовать текущую электромагнитную обстановку в сети. Кроме того, такой характер оказываемого нагрузкой печи воздействия накладывает определенные трудности на сглаживание возмущений, которые в первую очередь связаны со скоростью ответной реакции установленных компенсирующих устройств.

Таким образом, задача соблюдения соответствия ПКЭ в сетях, питающих ДСП, установленным нормам является достаточно сложной и трудоемкой, поскольку необходимо произвести подробный анализ текущих режимов исследуемой системы электроснабжения и дать взвешенную оценку целесообразности и эффективности тех или иных предлагаемых мероприятий по улучшению качества электроэнергии. Однако эта задача является приоритетной и требует обязательного выполнения в целях обеспечения надежности систем электроснабжения.

## **Список источников**

1. Строганов А. И., Сергеев Г. Н., Лабуневич А. И. Дуговые электропечи. М.: Металлургия, 1972. 288 с.
2. Дуговая сталеплавильная печь // Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. URL: <https://metallolome.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (дата обращения: 07.04.2023).
3. Дуговая сталеплавильная печь // Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. URL: <https://metallurgist.pro/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (дата обращения: 07.04.2023).
4. Дуговая печь // Горная промышленность. URL: <http://mining-prom.ru/rud/zhelez/dugovaya-pech/> (дата обращения: 25.04.2023).
5. Афонаскин А. В., Дудоров В. И. Что такое электродуговые печи постоянного тока // Вестник КГУ. 2008. № 3. С. 60–66.

6. Линчевский Б. В., Соболевский А. Л., Кальменев А. А. *Металлургия черных металлов: учебник для техникумов. 2-е изд.* М.: Metallurgy, 1986. 360 с.
7. Ополева Г. Н. *Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учеб. пособие.* М.: Форум, 2019. 416 с.
8. Бозжанова Р. Н., Живаева О. П. *Общепромышленные потребители систем электроснабжения. Конспект лекций для студентов всех форм обучения специальности 050718 — Электроэнергетика.* Алматы: АИЭС, 2008. 49 с.
9. *Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И. П. Евтюкова [и др.]; под ред. А. Д. Свенчанского.* М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
10. Ярошевич В. В., Карпов А. С. Влияние нестационарных электромагнитных воздействий на силовые трансформаторы // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика.* 2014. № 8. С. 54–62.
11. Проблемы локализации источников искажений электроэнергии и определение вклада подключенных потребителей в искажение или нормализацию качества электроэнергии / В. В. Ярошевич [и др.] // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика.* 2010. № 1. С. 126–138.
12. Singh A., Singh R. K., Singh A. K. Power quality issues of electric arc furnace and their mitigations — a review // *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.* 2017. Vol. 4, No. 4. P. 22–41.
13. Русских П. О., Ярошевич В. В., Карпов А. С. Основные причины сокращенного срока службы силовых трансформаторов // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика.* 2016. № 13. С. 72–84.
14. Ласица В. В. Колебания напряжения. Влияние дуговых сталеплавильных печей на колебания напряжения // *Актуальные проблемы энергетики. СНТК-78.* 2020. С. 58–62.
15. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // *Energy.* 2016. Vol. 115. P. 830–839.
16. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces / ed. A. Eberhard. Rijeka: InTech, 2011. 362 p.
17. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques // *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2014. Vol. 3, No. 1. P. 1121–1124.
18. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения // *Труды Нижегородского технического университета имени Р. Е. Алексеева.* 2010. Т. 81, № 2. С. 202–210.
19. Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and static VAR compensator / B. S. Jebaraj [et al.] // *Electronics.* 2021. No. 10. P. 1125.
20. Cano Plata E. A., Tacca H. E. Arc furnace modeling in ATP-EMTP // *International Conference on Power Systems Transients.* Montreal, 2005. IPST05-067.
21. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.
22. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
23. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
24. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
25. Гаврилов Ф. А., Цыбуля В. В. Влияние дуговых сталеплавильных печей малых объемов на работу электрооборудования // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* 2010. № 20. С. 241–246.

26. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
27. Электромагнитная совместимость потребителей: монография / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
28. Арриллага Д., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
29. Ершов А. М. Системы электроснабжения: курс лекций: в 4 ч. Ч. 2: Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. 230 с.
30. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей. 4-е изд. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

## References

1. Stroganov A. I., Sergeev G. N., Labunovich A. I. *Dugovye jelektropechi* [Electric arc furnaces]. Moscow, Metallurgija, 1972, 288 p.
2. *Dugovaja staleplavil'naja pech'* [Electric arc furnace]. *Nauchno-tehnicheskij portal o metallurgii, gornoj promyshlennosti, mashinostroenii, obrabotke metallov, jenergetike* [Scientific and technical portal on metallurgy, mining, mechanical engineering, metal processing, power engineering]. (In Russ.). Available at: <https://metallolome.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (accessed 07.04.2023).
3. *Dugovaja staleplavil'naja pech'* [Electric arc furnace]. *Nauchno-tehnicheskij portal o metallurgii, gornoj promyshlennosti, mashinostroenii, obrabotke metallov, jenergetike* [Scientific and technical portal on metallurgy, mining, mechanical engineering, metal processing, power engineering]. (In Russ.). Available at: <https://metallurgist.pro/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (accessed 07.04.2023).
4. *Dugovaja pech'* [Electric arc furnace]. *Gornaja promyshlennost'* [Mining]. (In Russ.). Available at: <http://mining-prom.ru/rud/zhelez/dugovaya-pech/> (accessed 25.04.2023).
5. Afonaskin A. V., Dudorov V. I. Chto takoe jelektrodugovye pechi postojannogo toka [What are DC electric arc furnaces]. *Vestnik KGU* [Bulletin of Kazan State University], 2008, No. 3, pp. 60–66. (In Russ.).
6. Linchevskij B. V., Sobolevskij A. L., Kal'menev A. A. *Metallurgija chernyh metallov* [Metallurgy of ferrous metals]. Moscow, Metallurgija, 1986, 360 p.
7. Opoleva G. N. *Jelektrosnabzhenie promyshlennyh predpriyatij i gorodov* [Electrical power supply of industrial enterprises and cities]. Moscow, Izdatel'skij Dom Forum, 2019, 416 p.
8. Bozzhanova R. N., Zhivaeva O. P. *Obshhepromyshlennye potrebiteli sistem jelektrosnabzhenija* [General industrial consumers of power supply systems]. Almaty, AIJeS, 2008, 49 p.
9. Evtjukova I. P., Kacevich L. S., Nekrasova N. M., Svenchanskij A. D. *Jelektrotehnologicheskie promyshlennye ustanovki* [Electro-technological industrial installations]. Moscow, Jenergoizdat, 1982, 400 p.
10. Jaroshevich V. V., Karpov A. S. Vlijanie nestacionarnyh jelektromagnitnyh vozdeystvij na silovye transformatory [Influence of non-stationary electromagnetic influence on power transformers]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2014, No. 8, pp. 54–62. (In Russ.).
11. Jaroshevich V. V., Nevretdinov Ju. M., Fastij G. P., Karpov A. S. Problemy lokalizacii istochnikov iskazhenij jelektroenergii i opredelenie vklada podkljuchennyh potrebitelej v iskazhenie ili normalizaciju kachestva jelektroenergii [Problems of localization of power distortion sources and determining the contribution of connected consumers to distortion or normalization of power quality]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2010, No. 1, pp. 126–138. (In Russ.).
12. Singh A., Singh R. K., Singh A. K. Power quality issues of electric arc furnace and their mitigations — a review. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2017, Vol. 4, No. 4, pp. 22–41.

13. Russkih P. O., Jaroshevich V. V., Karpov A. S. Osnovnye prichiny sokrashhennogo sroka sluzhby silovykh transformatorov [Main causes of shortened service life of power transformers]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2016, No. 13, pp. 72–84. (In Russ.).
14. Lasica V. V. Kolebanija naprjazhenija. Vlijanie dugovykh staleplavil'nyh pechej na kolebanija naprjazhenija [Voltage fluctuations. Influence of electric arc furnaces on voltage fluctuations]. *Aktual'nye problemy jenergetiki* [Topical problems of power engineering], 2022, pp. 58–62. (In Russ.).
15. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*, 2016, Vol. 115, pp. 830–839.
16. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces. Rijeka, InTech, 2011, 362 p.
17. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, Vol. 3, No. 1, pp. 1121–1124.
18. Vagin G. Ja., Sevost'janov A. A., Jurtaev S. N. Jelektromagnitnaja sovmestimost' dugovykh pechej i sistem jelektrosnabzhenija [Electromagnetic compatibility of electric arc furnaces and power supply systems]. *Trudy Nizhegorodskogo tehničeskogo universiteta im. R. E. Alekseeva* [Transactions of Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alekseev], 2010, Vol. 81, No. 2, pp. 202–210. (In Russ.).
19. Jebaraj B. S., Bennet J., Kannadasan R., Alsharif M. H., Kim M., Aly A. A., Ahmed M. H. Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and static VAR compensator. *Electronics*, 2021, No. 10, 1125.
20. Cano Plata E. A., Tacca H. E. Arc furnace modeling in ATP-EMTP. Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients. Montreal, 2005, IPST05-067.
21. *GOST 30804.4.7-2013. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podključaemykh k nim tehničeskikh sredstv* [Electromagnetic compatibility of technical means. General guidelines for measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical facilities connected to those]. Moscow, Standartinform, 2013, 40 p.
22. *GOST 33073-2014. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p.
23. *GOST 30804.4.30-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoi jenergii* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p.
24. *GOST 32144-2013. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p.
25. Gavrilov F. A., Cybulja V. V. Vlijanie dugovykh staleplavil'nyh pechej malyh ob'emov na rabotu jelektrooborudovanija [Influence of electric arc furnaces of small volumes on the electrical equipment operation]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskije nauki* [Bulletin of Priazov State Technical University. Technical Sciences], 2010, No. 20, pp. 241–246. (In Russ.).
26. Zhezhelenko I. V., Saenko Ju. L. *Pokazateli kachestva jelektricheskoi jenergii i ih kontrol' na promyshlennykh predpriyatijah* [Power quality indices and control of those at industrial enterprises]. Moscow, Jenergoatomizdat, 2000, 252 p.

27. Zhezhelenko I. V., Shidlovskij A. K., Pivnjak G. G., Saenko Ju. L., Nojberger M. A. *Jelektromagnitnaja sovmestimost' potrebitelej* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mechanical engineering, 2012, 351 p.
28. Arrillaga D., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v jelektricheskikh sisitemah* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1990, 320 p.
29. Ershov A. M. *Sistemy jelectrosnabzhenija. Chast' 2: Jelektricheskie nagruzki. Kompensacija reaktivnoj moshhnosti* [Power supply systems. Part 2: Electrical loads. Reactive power compensation]. Chelyabinsk, Publishing Center of South Ural State University, 2018, 230 p.
30. Karapetjan I. G., Fajbisovich D. L., Shapiro I. M. *Spravochnik po proektirovaniju jelektricheskikh setej* [Handbook for designing electrical networks]. Moscow, ENAS, 2012, 376 p.

***Информация об авторе***

**Е. И. Губская** — инженер.

***Information about the author***

**E. I. Gubskaya** — Engineer.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.316  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ВЛ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

**Ольга Валерьевна Залесова**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия, o.zalesova@ksc.ru*

### **Аннотация**

Статья посвящена вопросу изменения интенсивности электромагнитного влияния контактной сети переменного тока на отключённую линию электропередачи высокого напряжения в результате модернизации участка железной дороги. Построены расчётные модели тяговой сети переменного тока и линии электропередачи в программе ATP-EMTP. Проведено сравнение результатов расчётов влияния контактной сети одно- и двухпутного участков железной дороги переменного тока.

### **Ключевые слова:**

линия электропередачи высокого напряжения, электрифицированная железная дорога переменного тока, контактная сеть, наведённое напряжение

### **Благодарности:**

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### **Для цитирования:**

Залесова О. В. Прогнозирование влияния электромагнитного поля контактной сети модернизированного участка Октябрьской железной дороги на ВЛ высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 39–48. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004.

Original article

## **FORECASTING THE INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE MODERNIZED SECTION OVERHEAD CONTACT SYSTEM OF OKTYABRSKAYA RAILWAY ON THE HV OVERHEAD LINES**

**Olga V. Zalesova**

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia, o.zalesova@ksc.ru*

### **Abstract**

The article is devoted to the issue of changing the intensity of the electromagnetic influence of the AC overhead contact system on the disconnected HV transmission line as a result of the modernization of the railway section. Calculation models of AC traction network and power transmission line are built in the ATP-EMTP program. The comparison of the results of calculations of the induced voltage on the disconnected transmission line caused by the influence of the AC overhead contact system of a single- and double-track sections of an AC current railway is carried out.

### **Keywords:**

HV transmission line, AC electric railway, overhead contact system, induced voltage

### **Acknowledgments:**

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### **For citation:**

Zalesova O. V. Forecasting the influence of the electromagnetic field of the modernized section overhead contact system of Oktyabrskaya railway on the HV overhead lines // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 39–48. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004.

### **Введение**

В настоящее время провозная способность железнодорожных подходов к Мурманскому транспортному узлу (МТУ) составляет порядка 20–25 млн т в год. На участке Петрозаводск —

Мурманск она практически исчерпана [1]. Это обстоятельство не позволяет Мурманскому порту, который является самой большой погрузочно-разгрузочной компанией Арктического бассейна России, привлекать новые крупные грузопотоки, однако к 2025 г. объём пропуска угля и нефтеналивных грузов планируется увеличить до 45 млн т в год [2]. И такие цифры неслучайны. На западном берегу Кольского залива началось строительство морского порта Лавна — нового угольного терминала, который ПАО «Государственная транспортная лизинговая компания» рассматривает на возможность перевалки генеральных грузов в контейнерах [3], его строительство планируют завершить к концу 2023 г.

Рост экспортного потенциала Мурманского транспортного узла потребует серьёзного укрепления его железнодорожной составляющей. Согласно проекту «Комплексного развития МТУ», участок железной дороги от Волховстроя до Мурманска должен стать двухпутным [1]. В рамках данного проекта на Октябрьской железной дороге предстоит построить вторые главные пути на семи участках и выполнить реконструкции двенадцати станций. На сегодняшний день идет активное строительство на участке Оленегорск — Мурманск, протяжённость пути составит 106 км [2, 3].

Расширение инфраструктуры железной дороги приведёт к изменению электромагнитной обстановки между тяговой сетью и смежными протяжёнными проводниками. Значительные перемены произошли ещё в 2001 г., когда был осуществлён перевод участка Лоухи — Мурманск с постоянного на переменный ток. В результате это позволило сократить потери электроэнергии, решить проблему электрокоррозии на подземных коммуникациях, упростить тяговые подстанции по наличию силового оборудования, увеличить расстояния между тяговыми подстанциями (были ликвидированы станции стыкования), а также показало ряд других преимуществ модификации данного участка [4, 5]. Но, с другой стороны, новая система тягового электроснабжения, электрифицированная на переменном токе, стала источником значительного электромагнитного влияния из-за работы выпрямительно-инверторных агрегатов, установленных на тяговых подстанциях и электроподвижных составах [6].

В настоящей статье с помощью программного моделирования исследуется электромагнитное влияние, оказываемое тяговой сетью модернизированного в ближайшем будущем двухпутного участка Октябрьской железной дороги, на примере одной из смежных воздушных линий (ВЛ) класса напряжения 110 кВ, а также проводится сравнение результатов расчётов с подобными значениями, полученными при влиянии действующего по настоящее время однопутного участка железной дороги.

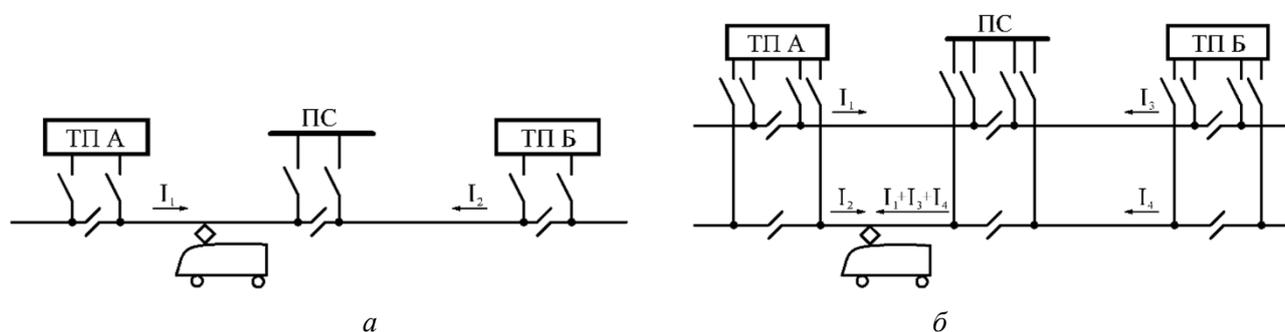
### **Схема питания контактной сети переменного тока с постом секционирования**

Надёжность и экономичность работы контактной сети определяется схемой питания и секционирования. Разделение контактной сети на электрически не связанные друг с другом участки (секции) необходимо также для удобства её обслуживания при эксплуатации и выполнении ремонтных работ в случае аварийных ситуаций. Для этой цели применяют воздушные промежутки (изолирующие сопряжения анкерных участков), нейтральные вставки и секционные изоляторы. Рельсовый путь, в отличие от контактной сети, не секционируется.

С позиции работы тяговых подстанций различают схемы с одно- и двусторонним питанием контактной сети. В первом случае нагрузка на определённом участке железной дороги получает питание только от одной тяговой подстанции, во втором — питание осуществляется от двух электроустановок одновременно. Как правило, на дорогах переменного тока, в том числе и на Октябрьской магистрали, используют схему двустороннего питания (исключения могут встречаться на конечных участках или на небольших ответвлениях от основной магистрали). В этом случае участок контактной сети с обеих сторон поочерёдно подключается к одной и той же фазе (А или В), рельсы — к фазе С. Данная схема получила широкое распространение по ряду причин: она имеет более равномерную загрузку тяговых подстанций и контактной сети во времени, снижает потери напряжения и потери энергии в контактной сети, обеспечивает более надёжное питание тяговых нагрузок в случае аварийного режима, а также за счёт протекания меньших токов в контактной сети и рельсах снижает электромагнитное влияние на смежные протяжённые проводники [7].

Увеличение числа путей на однопутном участке Октябрьской железной дороги приведёт к изменению действующей схемы, в частности, необходимо будет учитывать схему соединения контактных подвесок смежных путей. Существуют три типа питания контактных подвесок: раздельная, узловая и параллельная. В первом случае работа контактных подвесок организована независимо друг от друга, во втором — в средней части фидерной зоны их соединяют с помощью поста секционирования, где контактная сеть каждого пути разделяется воздушными промежутками, в третьем, помимо поста секционирования, добавляют переключки (пункты параллельного соединения).

В настоящем исследовании в качестве основы для модели модернизированного двухпутного участка была принята узловая схема питания контактных подвесок. Известно, что при переводе с постоянного на переменный ток на данном участке был установлен пост секционирования производства НИИЭФА [4]. Схемы питания контактной сети одно- и двухпутного участков, по которым проводились расчёты, представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема двустороннего питания контактной сети с постом секционирования одно- (а) и двухпутного (б) участков железной дороги

**Fig. 1.** Scheme of a two-way power supply of a contact network with a sectioning post а) a single-track section of the railway, б) a double-track section of the railway

Располагая такими исходными данными, как грузопоток, количество и типы электроподвижных составов, их местоположение на межподстанционной зоне (межпоездные интервалы), расчёты электроснабжения участков железных дорог можем выполнить, используя следующие методы: подвижных нагрузок, равномерного распределения нагрузки, имитационного моделирования, метод Розенфельда или метод Маркварда. Все они выполняются без учёта графика движения поездов и подходят для расчётов на дальнюю перспективу.

Поскольку описание расчёта тягового тока в контактной подвеске двухпутного участка с узловым схемой питания контактной сети уже было представлено в работе [8] и существующие методы расчёта подробно изложены во многих литературных источниках, например, [7, 9, 10 и др.], то в настоящей работе акцента на этом вопросе не делается. Единственный момент, который следует отметить, — это то, что ток в проводах контактных подвесок путей распределяется пропорционально расстояниям от питающих подстанций до электровоза и распределение нагрузки между фидерами никак не зависит ни от схемы соединения рельсовой сети, ни от её сопротивления.

### Физические и геометрические параметры исследуемых объектов

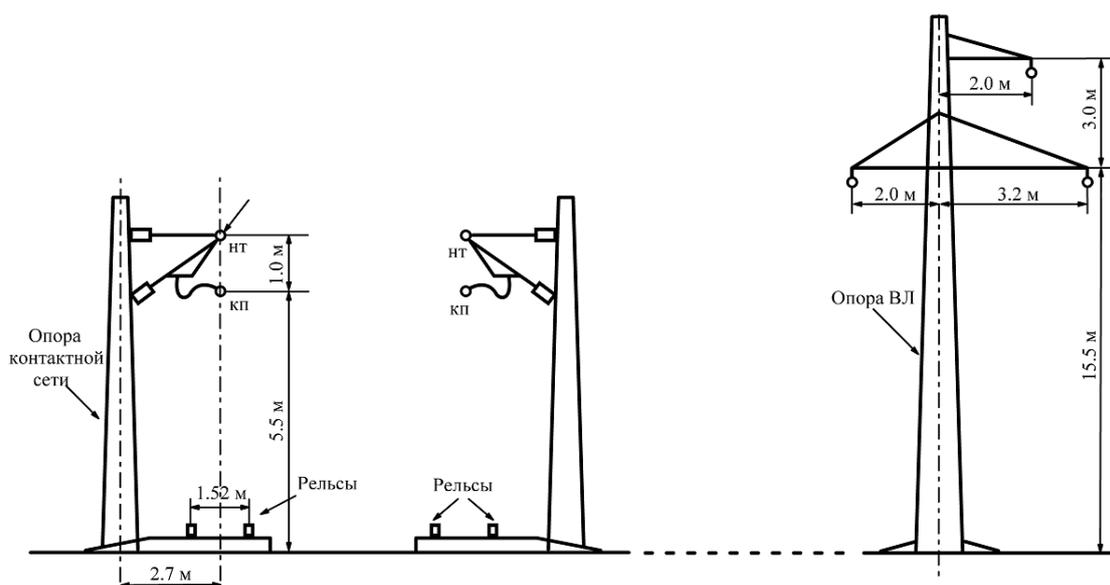
Участок железной дороги, на котором прокладываются вторые пути, достаточно хорошо изучен с точки зрения характера и возможной интенсивности электромагнитного влияния, оказываемого его контактной сетью на смежные проводники (сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН экспериментальные исследования проводились в 2008 и 2011 гг.). Поэтому было справедливо для нового исследования с учётом модернизации инфраструктуры объекта остановить выбор непосредственно на нём.

На тяговых подстанциях, с которых осуществляется питание участка, установлены по два тяговых трёхфазных трансформатора типа ТДТНЖ — 40 МВА/110 кВ, один из них резервный. При переводе участка Лоухи — Мурманск с постоянного на переменный ток было принято сохранить

существующую в то время контактную подвеску (марка проводов и тросов контактной сети — М-120 + 2МФ-100) [4]. Такое решение было обусловлено возможностью оставить установившуюся за много лет регулировку контактной сети (ее ветроустойчивость) и, как следствие, избежать значительных затрат на ее реконструкцию.

Длина участка железной дороги составляет 73 км. На всём своём протяжении он соседствует с одноцепными воздушными линиями электропередачи класса напряжения 110 кВ. Оценка наведённого напряжения проводилась для одной из таких ВЛ длиной 19,5 км с преобладающим типом опор ПБ-29 и маркой проводов ВЛ — АС-185.

Схема расположения проводов тягового электроснабжения участка железной дороги и проводов ВЛ в разрезе изображена на рис. 2. При модернизации действующего участка добавляется второй путь (на схеме он обозначен опорой, расположенной слева). Физические характеристики и параметры проводов исследуемых объектов представлены в таблице.



**Рис. 2.** Схема расположения проводов тягового электроснабжения и проводов ВЛ  
**Fig. 2.** The scheme of location of wires of the traction power supply and the power line

Параметры проводов тяговой сети и ВЛ  
 Wires parameters of the traction network and the overhead power line

Параметр	Свойства			
	Контактный провод	Несущий трос	Рельс	Провод ВЛ
Тип провода	ФМ-100	М-120	Р65	АС-150/24
Радиус провода, см	0,6	0,7	5,1	0,86
Сопротивление постоянному току, Ом/км	0,176	0,156	0,13	0,194

Исходя из геометрических параметров участок сближения (взаимное расположение) железной дороги и ВЛ делится на две практически равных части: первая имеет протяжённость 9,7 км и ширину сближения 910 м, вторая — 9,8 км и 480 м соответственно. Для второго пути ширина сближения увеличивается на 10 м. Разность величин последнего параметра объясняется заменой косоугольного сближения параллельным — по рекомендациям, приведённым в источниках [7, 11]. Схема параллельного сближения трасс объектов представлена на рис. 3.

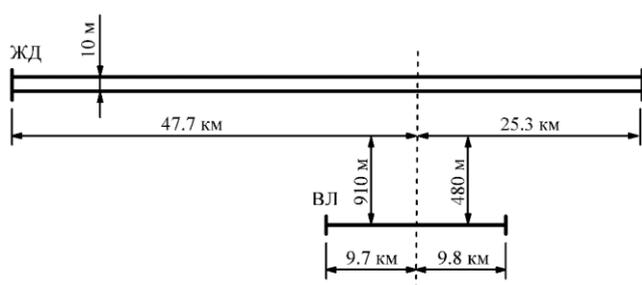


Рис. 3. Типовая схема взаимного расположения трасс участка ЖД и ВЛ

Fig. 3. Typical scheme of the relative position of the tracks of the railway section and power line

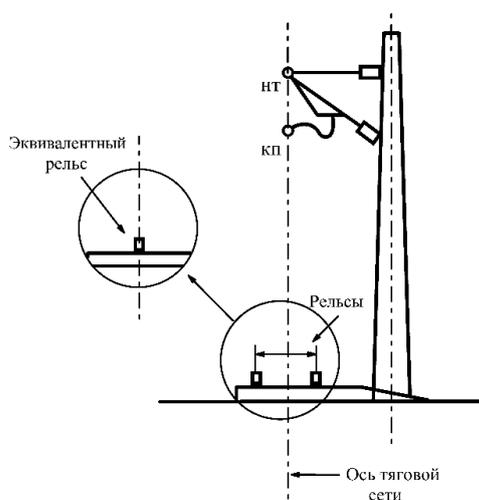


Рис. 4. Схема перехода к эквивалентному рельсу

Fig. 4. Transition scheme to an equivalent rail

Расчёты наведённого напряжения на ВЛ выполнялись при различных нагрузках на участке. Расстояния между составами, находящимися на одном пути, составляли 7 км в соответствии с минимальным значением межпоездного интервала в 6 мин и средней скорости поезда, равной 70 км/ч. Ток, питающий один ЭПС, задавался равным 250 А, ВЛ была отключена и заземлена только по концам на подстанциях, сопротивление заземляющих устройств подстанций принималось равным 0,5 Ом.

Необходимо также отметить, что исследование проводилось на местности, расположенной в Арктической зоне, для которой характерны грунты с низкой проводимостью. В расчётных моделях величина удельного сопротивления грунта задавалась 1000 Ом·м.

### Результаты и анализ расчётов

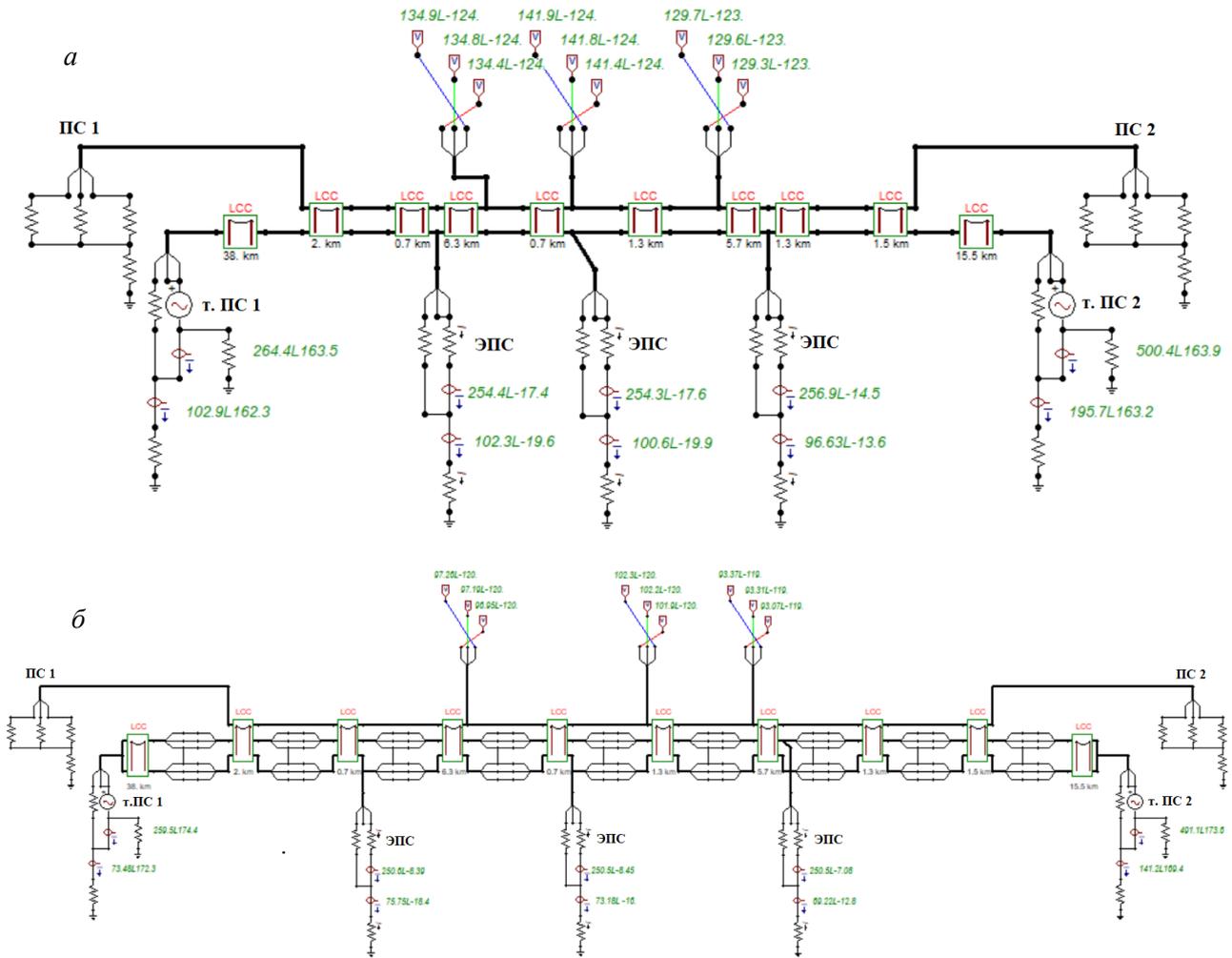
Расчёты наведённого напряжения на исследуемой ВЛ ранее уже выполнялись при различных схемах заземления [5]. И как показали многочисленные исследования влияния контактной сети железной дороги переменного тока, максимальные значения наведённого напряжения на смежной отключённой линии наблюдались в момент прохождения ЭПС середины участка сближения (место ремонта на линии располагалось напротив ЭПС).

Поскольку в настоящей работе решалась задача определения изменения электромагнитного влияния контактной сети после модернизации железнодорожного участка, то в исследовании использовалась только одна схема заземления ВЛ — по концам. Вначале были рассмотрены случаи влияния, равные по возможности размещения нагрузки для обоих вариантов исполнения участка. Результаты расчётов наведённого напряжения на ВЛ представлены в виде графиков на рис. 6.

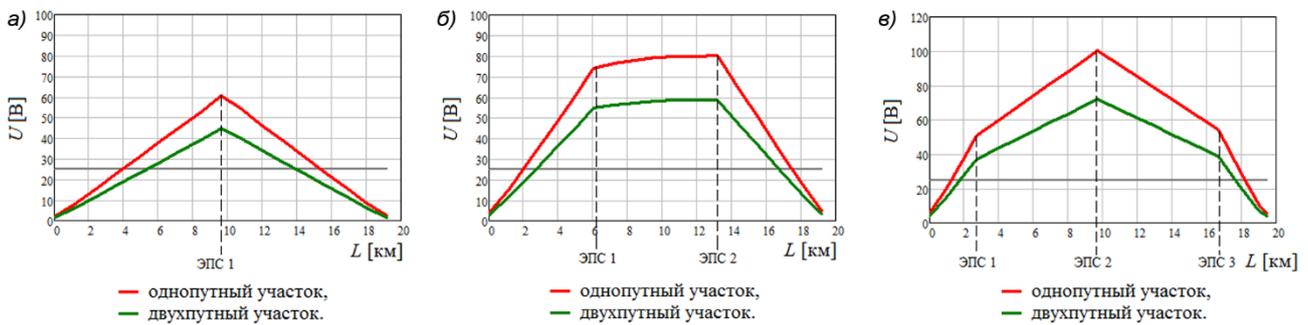
### Модели тяговой сети железной дороги и ВЛ

Создание расчётных моделей с одно- и двухпутными участками для исследования интенсивности наведённого напряжения на отключённой ВЛ выполнялось в программе АТР-ЕМТР. Для удобства задания параметров тяговой сети в программе было принято два рельса одного пути заменить одним эквивалентным, расположенным на оси тяговой сети, параллельно контактному проводу и несущему тросу (рис. 4). В источнике [9] подробно изложен метод определения эквивалентного сопротивления и радиуса поперечного сечения рельса.

Модели разбивались на участки в зависимости от численности электроподвижных составов (ЭПС) и их размещения на межподстанционной зоне, а также геометрии сближения исследуемых объектов. Если ранее в [5] распределение тока в тяговой сети в расчётной модели осуществлялось с помощью источника переменного тока и переходного сопротивления рельс — земля таким образом, что половина обратного тягового тока возвращалась на подстанции через землю, то сейчас применён комплекс сопротивлений, позволяющий более точно определять соотношение этих величин. В качестве примера на рис. 5 представлены схемы действующего и модернизированного участков с расположенной вблизи воздушной линии при наличии трёх ЭПС.



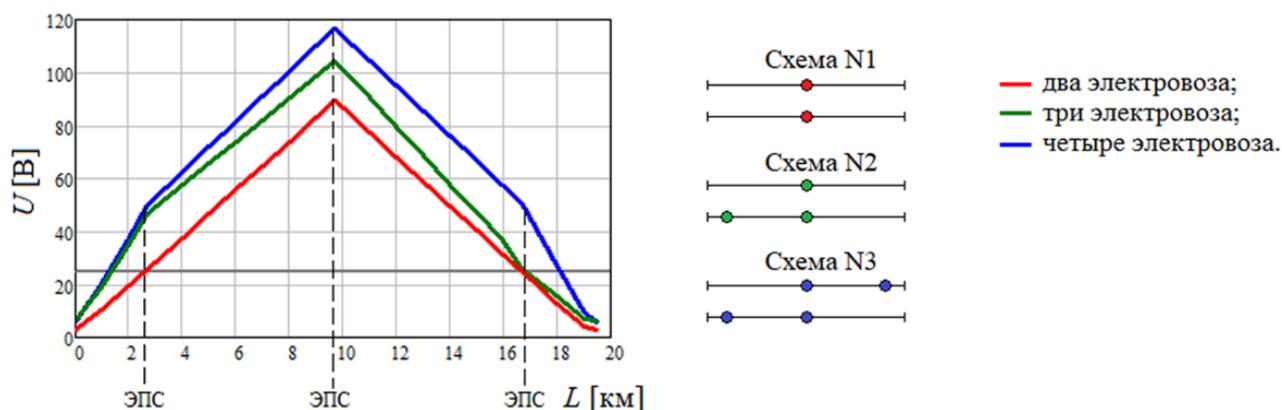
**Рис. 5.** Модель тяговой сети одно- (а) и двухпутного (б) участков железной дороги и ВЛ  
**Fig. 5.** Model of the traction network of the single-track railway (a) and double-track railway (b) section and the overhead line



**Рис. 6.** Распределение наведённого напряжения на ВЛ для случаев: один (а), два (б) и три (в) ЭПС на участке  
**Fig. 6.** The distribution of the induced voltage on the power line for the cases: a) one locomotive is located on the railway section, б) two locomotives are located on the railway section, в) three locomotives are located on the railway section

Из результатов расчётов можно видеть, что значения наведённого напряжения на всём протяжении линии во всех трёх случаях разнятся в 1,4 раза для исследуемых моделей участков.

Уменьшение уровня электромагнитного влияния, вызванного контактной сетью двухпутного участка, объясняется в данном случае понижением сопротивления рельсовой сети практически в два раза по сравнению с однопутным участком за счёт рельсов вторых путей, тем самым увеличивается коэффициент защитного действия рельса и снижается интенсивность стекания тока в землю. Однако если использовать возможности увеличения нагрузки на уже модернизированном участке железной дороги, то картина распределения наведённого напряжения на линии может выглядеть следующим образом (рис. 7).



**Рис. 7.** Распределение наведённого напряжения на ВЛ, вызванное электромагнитным влиянием двухпутного участка железной дороги

**Fig. 7.** Distribution of the induced voltage on the power line caused by the electromagnetic influence of the double-track section of the railway

Уровень наведённого напряжения зависит от численности ЭПС, их дислокации на участке и в определённый момент может превысить порог значений, полученных при влиянии однопутного участка, исходя из ограничивающих возможностей по нагрузке последнего.

## Выводы

Исследование показало, что уровень наведённого напряжения на отключённой и заземлённой по концам воздушной линии электропередачи при равных нагрузках на одно- и двухпутном участках в 1,4 раза будет меньше в случае последнего. Однако с учетом пропускной способности двухпутного участка уровень наведённого напряжения существенно возрастает при увеличении численности ЭПС на дистанции. Оценить интенсивность электромагнитного воздействия контактной сети железной дороги, электрифицированной на переменном токе, на выведенную в ремонт ВЛ достаточно затруднительно, из-за большого количества влияющих факторов, некоторые из которых являются переменной величиной. Помимо этого, электромагнитная обстановка на ремонтируемой ВЛ может зависеть также от других источников электромагнитного влияния, например, от проходящих вблизи (в одном коридоре) других линий высокого напряжения.

## Список источников

1. Михайлов А. Пропускная способность железнодорожной инфраструктуры в Заполярье вырастет // Российская газета — Экономика Северо-Запада. 2020. 10 ноября. № 252 (8306). URL: <https://rg.ru/2020/11/10/reg-szfo/propusknaia-sposobnost-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-v-zapoliare-vyrastet.html> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Саблин В. Пути ведут в порт // Гудок. 2020. 11 марта. № 42 (26891). URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1496960&archive=2020.03.11> (дата обращения: 15.05.2023).
3. Рагозин В. «Лавной» займётся новый подрядчик // Мурманский вестник. 2021. 21 июля. URL: <https://www.mvestnik.ru/politics/lavnoj-zajmetsya-novyj-podryadchik/> (дата обращения: 15.05.2023).

4. Перевод участка Лоухи — Мурманск на переменный ток // Евразия Вести. 2007. № IV. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2007-04a07> (дата обращения: 15.05.2023).
5. Залесова О. В., Колобов В. В., Ефимов Б. В. Расчёт наведённого напряжения на отключённых линиях электропередачи, вызванных влиянием контактной сети железной дороги, с помощью программы ATP-EMTP // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 12 (35). С. 48–56.
6. Zalesova O. V. Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. doi:10.1109/foreastcon50210.2020.9271494.
7. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
8. Залесова О. В., Прокопчук П. И. Распределение тяговых токов в контактной сети двухпутного участка железной дороги // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 8 (34). С. 67–71.
9. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
10. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 638 с.
11. Костенко М. В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно- и биосферу. Л.: Изд-во ЛПИ, 1984. 56 с.

## References

1. Mikhaylov A. Propusknaya sposobnost' zhelezнодороzhnoy infrastruktury v Zapolyar'e vyrastet [The capacity of the railway infrastructure in the Arctic will increase]. *Rossiyskaya gazeta — Ekonomika Severo-Zapada* [The Russian newspaper — Economy of the NorthWest], 2020, No. 252 (8306), November 10th. (In Russ.). Available at: <https://rg.ru/2020/11/10/reg-szfo/propusknaia-sposobnost-zhelezнодороzhnoy-infrastruktury-v-zapolyare-vyrastet.html> (accessed 15.05.2023).
2. Sablin V. Puti vedut v port [The paths lead to the port]. *Gudok* [The beep], 2020, No. 42 (26891), March 11th. (In Russ.). Available at: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1496960&archive=2020.03.11> (accessed 15.05.2023).
3. Ragozin V. “Lavnoy” займыотсыа novyy podryadchik [“Lavna” will be handled by a new contractor]. *Murmanskiy vestnik* [The Murmansk bulletin], 2021, July 21. (In Russ.). Available at: <https://www.mvestnik.ru/politics/lavnoj-zajmetsya-novyy-podryadchik/> (accessed 15.05.2023).
4. Perevod uchastka Loukhi – Murmansk na peremenny tok [Transfer of the Loukhi — Murmansk section to alternating current]. *Evraziya Vesti* [Eurasia News], 2007, No. IV. (In Russ.). Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2007-04a07> (accessed 15.05.2023).
5. Zalesova O. V., Kolobov V. V., Efimov B. V. Raschyot navedyonnoogo napryazheniya na otklyuchyonnykh liniyakh elektroperedachi, vyzvannykh vliyaniem kontaktnoy seti zheleznoy dorogi, s pomoshch'yu programmy ATP-EMTP [Calculation of induced voltage in disconnected transmission lines caused by electromagnetic influence of railway overhead contact system using program ATP-EMTP]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2016, No. 12 (35), pp. 48–56. (In Russ.).
6. Zalesova O. V. Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020, doi:10.1109/foreastcon50210.2020.9271494.
7. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electricity supply of electrified railways]. Moscow, Transport, 1982, 528 p. (In Russ.).
8. Zalesova O. V., Prokopchuk P. I. Raspredelenie tyagovykh tokov v kontaktnoy seti dvukhpутного uchastka zheleznoy dorogi [Traction currents distribution in overhead contact system of railway double-track]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2015, No. 8 (34), pp. 67–71. (In Russ.).

9. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. *Elektrosnabzhenie zheleznikh dorog* [Railway electricity supply]. Ekaterinburg, USURT, 2014, 432 p.
10. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, EMC MR, 2002, 638 p.
11. Kostenko M. V. *Vliyaniye elektricheskikh setey vysokogo napryazheniya na tekhn- i biosferu* [The influence of high-voltage electric grids on the techno- and biosphere]. Leningrad, LPI, 1984, 56 p.

***Информация об авторе***

**О. В. Залесова** — кандидат технических наук, научный сотрудник.

***Information about the author***

**O. V. Zalesova** — PhD (Engineering), Researcher.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.318  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005

## ЭКВИВАЛЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МИ-1201ИГ

**Никита Игоревич Лазарев<sup>1</sup>, Виталий Валентинович Колобов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>n.lazarev@ksc.ru

<sup>2</sup>v.kolobov@ksc.ru

### Аннотация

Представлена разработка эквивалента магнитной системы, имеющего схожие характеристики с электромагнитом масс-спектрометра МИ-1201ИГ. Этот эквивалент предназначен для настройки электронных блоков системы магнитной стабилизации масс-спектрометра. С помощью компьютерного моделирования проведены расчёты распределения магнитного поля электромагнита и определены его параметры, критически важные для работы датчиков на эффекте Холла в воздушном зазоре.

### Ключевые слова:

электромагнит постоянного тока, магнитная индукция, магнитное поле, датчик Холла

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Лазарев Н. И., Колобов В. В. Эквивалент магнитного поля масс-спектрометра МИ-1201ИГ // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 48–52. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005.

Original article

## THE EQUIVALENT OF THE MAGNETIC FIELD OF A MASS SPECTROMETER MI-1201IG

**Nikita I. Lazarev<sup>1</sup>, Vitalii V. Kolobov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>n.lazarev@ksc.ru

<sup>2</sup>v.kolobov@ksc.ru

### Abstract

This paper presents the development of an equivalent magnetic system that has similar characteristics to the electromagnet mass spectrometer MI-1201IG. This equivalent is intended for tuning the electronic blocks of the magnetic stabilization system of the mass spectrometer. Calculations of the distribution of the magnetic field of the electromagnet are carried out with the help of computer simulation and its parameters are determined, which are critical for the operation of sensors on the Hall effect in the air gap.

### Keywords:

DC electromagnet, magnetic induction, magnetic field, Hall sensor

### Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

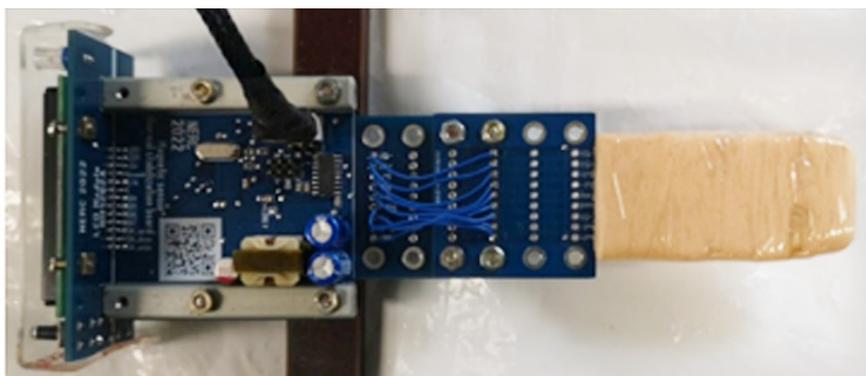
### For citation:

Lazarev N. I., Kolobov V. V. The equivalent of the magnetic field of a mass spectrometer MI-1201IG // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 48–52. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005.

Точность измерения и оперативность перехода между массами определяются магнитной системой масс-спектрометра. Часто бывает недостаточно поддерживать ток через электромагнит, изменение магнитного сопротивления отклоняющего магнита может привести к различным значениям его магнитной индукции при одном и том же токе. Причинами варьирования параметров магнита может быть изменение его воздушного зазора и магнитной проницаемости магнитопровода в ходе

эксперимента. Воздушный зазор в системе имеет небольшую величину, незначительное изменение зазора приведёт к значительному изменению индукции в зазоре, чему причинами могут быть нагрев магнитной системы и термические расширения конструкции во время эксперимента. По этой же причине происходит изменение проницаемости магнитопровода, что приводит к тем же последствиям. Второй важной особенностью магнитов является наличие остаточной индукции и коэрцитивной силы.

Широкое распространение в качестве датчиков магнитного поля в масс-спектрометрах получили датчики на эффекте Холла. В современной промышленности используются датчики на эффекте Холла с термокомпенсацией и термостабилизацией. На рис. 1 представлен датчик магнитного поля, применяемый в масс-спектрометре МИ-1201ИГ [1].



**Рис. 1.** Датчик магнитного поля

**Fig. 1.** Magnetic field sensor

Целью данной работы является проектирование электромагнита постоянного тока с воздушным зазором, в который будет помещаться активный элемент измерительной системы. Помимо получения требуемой индукции, необходимо получить качественную картину векторов магнитной индукции в магнитном зазоре, а именно минимальный градиент и минимальное отклонение магнитной индукции. Данные требования необходимы для того, чтобы при настройке электронных блоков масс-спектрометра элементы Холла магнитоизмерительной системы располагались в зоне с малым отклонением магнитной индукции как по вектору, так и по минимальному изменению значения от среднего.

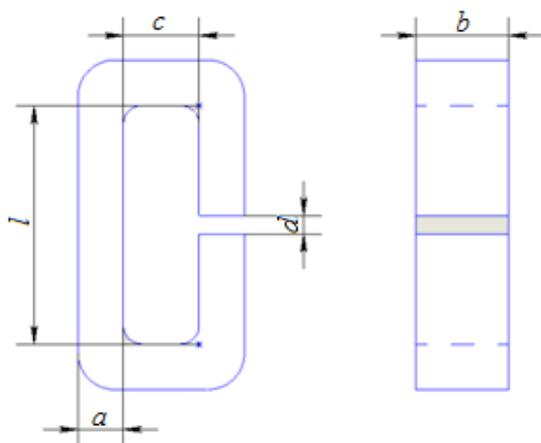
Для проектирования предоставлены следующие необходимые данные. Величина магнитной индукции  $B$  — 0,25 Тл при силе тока  $I$ , равной 1 А. Активное сопротивление обмотки — 10 Ом, индуктивность обмотки — не менее 1 Гн. В магнитной системе должен иметься воздушный зазор не менее 10 мм. Отклонение значения магнитной индукции от среднего в активной зоне — не более 0,25 %, глубина активной зоны — не менее 10 мм. Требуется определить основные размеры электромагнита и рассчитать обмоточные параметры катушки электромагнита. Также необходимо рассчитать распределение магнитного поля электромагнита постоянного тока.

В результате проведённого анализа магнитопроводов с целью достижения необходимых характеристик остановились на магнитопроводе ПЛ 25×50×120 из холоднокатаной стали марки 3406-08 ГОСТ 21427.1-83 толщиной 0,30–0,35 мм. Данный магнитопровод представляет собой два П-образных элемента, которые собираются в конструкцию без зазора (рис. 2). Для получения воздушного зазора принято установить с одной стороны вставку толщиной 10 мм из такого же материала. Размеры конструкции магнитопровода представлены в табл. 1.

Магнитный поток вычисляем по формуле

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1)$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $S$  — площадь поперечного сечения воздушного зазора, через который проходит магнитный поток.



**Рис. 2.** Геометрические размеры конструкции магнитопровода  
**Fig. 2.** Geometric dimensions of the magnetic core design

Размеры магнитопровода  
 Magnet core dimensions

Размеры магнитопровода, см				Воздушный зазор, мм
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>	<i>d</i>
2,45	5	4,1	13	10

Таблица 1

$$G = \mu_0 \frac{S}{d} \quad (6)$$

Рассчитываем проводимость потока рассеяния:

$$G_{\sigma} = \mu_0 \frac{l \cdot b}{c} \quad (7)$$

Для того чтобы получить действительную величину потока рассеяния, проводимость рассеяния берётся приведённой. Значение проводимости рассеяния, приведённой по потоку:

$$G_{\sigma 2} = \frac{G_{\sigma}}{2} \quad (8)$$

Индуктивность катушки определяется как

$$L = (G + G_{\sigma 2}) w^2 \quad (9)$$

#### Результаты расчёта

$\Phi$	$3,0625 \cdot 10^{-4}$ Вб
$R_M$	41 649 А/Вб
$R_{\text{зазор}}$	6 478 781 А/Вб
$F$	1997 А
$w$	1997
$L$	1 Гн

Обмотка катушки выполнялась изолированным проводом  $D = 1,06$  мм. Активное сопротивление обмотки рассчитывается по формуле

Магнитное сопротивление магнитопровода и воздушного зазора соответственно:

$$R_M = \frac{l}{S \cdot \mu_0 \cdot \mu} \quad (2)$$

и

$$R_{\text{зазор}} = \frac{d}{S \cdot \mu_0} \quad (3)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала цепи.

Магнитодвижущая сила представляет собою произведение магнитного потока и магнитного сопротивления:

$$F = \Phi (R_M + R_{\text{зазор}}) \quad (4)$$

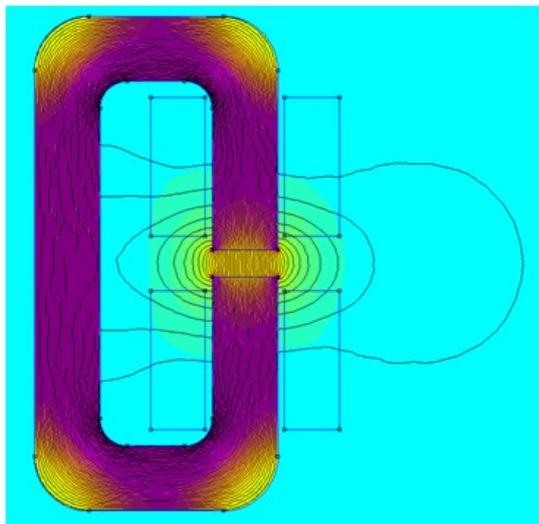
Число витков:

$$w = \frac{F}{I} \quad (5)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора:

$$R = l_{\text{cp}} \frac{w}{2} \cdot \frac{\rho_m}{S}, \quad (10)$$

где  $l_{\text{cp}}$  — средняя длина витка;  $\rho_m$  — удельное сопротивление меди.



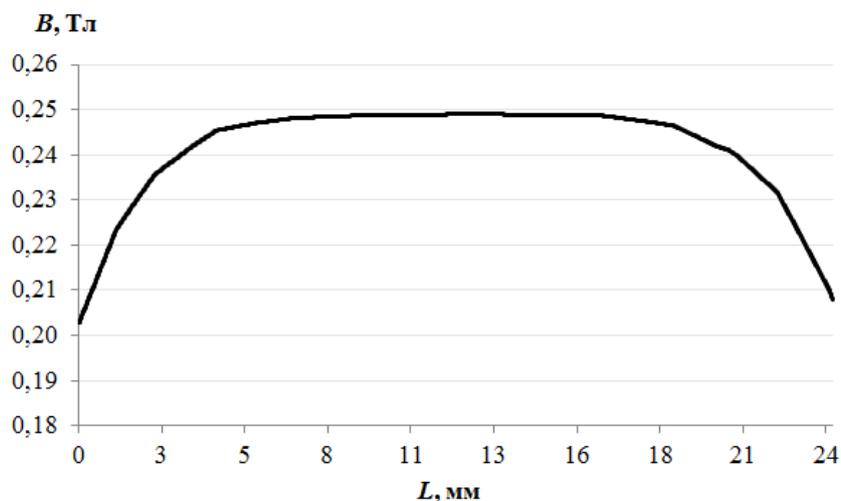
**Рис. 3.** Распределение магнитного поля  
**Fig. 3.** Magnetic field distribution

Для уменьшения потока, выходящего вне воздушного зазора, катушку разбили на две равные части и расположили в непосредственной близости у зазора. Таким образом, сопротивление  $R$  каждой из катушек 5 Ом и при последовательном соединении мы получаем необходимую величину активного сопротивления.

Любой постоянный магнит представляет собой источник магнитного поля с распределёнными параметрами. К расчёту магнитных систем при компьютерном моделировании применяют метод конечных элементов [2, 3]. Для аналитического расчёта использовалась программа FEMM 4.2. Прежде чем начать расчёт магнита, необходимо создать модель, которая будет состоять из опорных точек. После ввода всех опорных точек необходимо соединить их отрезками прямых линий или дуг, для того чтобы модель приняла законченный вид. После того как модель создана, необходимо задать свойства каждого из этих блоков и граничные условия [4].

Когда свойства модели и граничные условия заданы, можно строить сетку конечных элементов и производить расчёт модели. Распределение магнитного поля представлено на рис. 3.

Результаты расчёта магнитной составляющей  $B$  в воздушном зазоре представлены на рис. 4. В нашем случае необходимо получить однородность поля при уровне магнитной индукции 0,25 Тл. Неоднородность магнитного поля в воздушном зазоре составляет 16,14 %. Датчик будет помещён в активной зоне на участке от 7 до 17 мм, неоднородность поля этого участка определяется градиентом поля  $\Delta B/l$  58,7 мкТл/мм. Исходя из формы кривой, можем говорить о равномерности распределения поля в заданной области. Результаты неоднородности поля в воздушном зазоре представлены в табл. 2.



**Рис. 4.** График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре  
**Fig. 4.** Graph of the magnetic induction distribution in the air gap

Таблица 2

Результаты расчётов неоднородности поля  
Results of field inhomogeneity calculations

На всей ширине воздушного зазора (от 0 до 24 мм)			В активной зоне воздушного зазора (от 7 до 17 мм)		
Неоднородность	$\frac{\Delta B}{B_{\text{cp}}}, \%$	16,4	Неоднородность	$\frac{\Delta B}{B_{\text{cp}}}, \%$	0,24
Градиент	$\frac{\Delta B}{l}, \frac{\text{мкТл}}{\text{мм}}$	1625	Градиент	$\frac{\Delta B}{l}, \frac{\text{мкТл}}{\text{мм}}$	58,7

### Заключение

Разработанная магнитная система имеет такие же магнитные и электрические характеристики, что и электромагнит масс-спектрометра МИ-1201ИГ. В зазоре магнитной системы, в его средней части, обеспечивается требуемый низкий градиент магнитного поля и его высокая однородность.

### Список источников

1. Колобов В. В., Баранник М. Б. Система регулирования и стабилизации магнитного поля // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 5. С. 58–64. doi:10.1134/S0032816219050070. EDN: PCMLGW.
2. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Academia, 2006. 288 с.
3. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Сёмина И. А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 110–113. EDN: QBNDMJ.
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.

### References

1. Kolobov V. V., Barannik M. B. Sistema regulirovaniya i stabilizatsii magnitnogopolya [Magnetic field regulation and stabilization system]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 2019, No. 5, pp. 58–64. (In Russ.). doi:10.1134/S0032816219050070. EDN: PCMLGW.
2. Bul' O. B. *Metody raschyota magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS* [Methods of calculation of magnetic systems of electrical devices. The ANSYS program]. Moscow, Academia, 2006, 288 p.
3. Andreeva E. G., Tatevosyan A. A., Syomina I. A. Issledovanie osesimmetrichnoy modeli magnitnoy sistemy otkrytogo tipa [The investigation of an axiallysymmetric model of an open-type magnetic system]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2010, No. 1 (87), pp. 110–113. (In Russ.). EDN: QBNDMJ.
4. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 327 p.

### Информация об авторах

**Н. И. Лазарев** — инженер;

**В. В. Колобов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

### Information about the authors

**N. I. Lazarev** — Engineer;

**V. V. Kolobov** — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.317  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.006

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСНЫХ ОПН НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА С БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ

**Мария Алексеевна Лазарева<sup>1</sup>, Виталий Валентинович Колобов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>*m.celischeva@ksc.ru*

<sup>2</sup>*v.kolobov@ksc.ru*

### Аннотация

Статья направлена на анализ возможности построения системы дистанционного измерения токов утечки, измерения параметров импульсов тока, протекающего через ОПН, с регистрацией времени события с последующим накоплением и передачей её обслуживающему персоналу. Построена система передачи измеренных параметров по протоколу ZigBee. Произведён расчёт необходимого источника питания для непрерывной эксплуатации прибора на протяжении более 20 лет.

### Ключевые слова:

ZigBee, система на кристалле, ограничитель перенапряжения нелинейный, регистрация токов утечки ОПН

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Лазарева М. И., Колобов В. В. Построение системы измерения параметров подвесных ОПН на базе микроконтроллера с беспроводной передачей данных // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 14, № 6. С. 53–58. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.006.

Original article

## CONSTRUCTION OF A SYSTEM FOR MEASURING THE PARAMETERS OF SUSPENDED SURGE ARRESTERS BASED ON A MICROCONTROLLER WITH WIRELESS DATA TRANSMISSION

**Mariya A. Lazareva<sup>1</sup>, Vitalii V. Kolobov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>*m.celischeva@ksc.ru*

<sup>2</sup>*v.kolobov@ksc.ru*

### Abstract

The article is aimed at analyzing the possibility of constructing a system for remote measurement of leakage currents, measuring the pulses of current flowing through the surge arrester with the registration of the time of the event with subsequent accumulation and transmission to service personnel. A system for transmitting measured parameters via the ZigBee protocol is constructed. A calculation of the required power supply for continuous operation of the device for more than 20 years is made.

### Keywords:

ZigBee, System-on-a-Chip, surge arrester, registration of leakage currents of a surge arrester

### Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### For citation:

Lazareva M. I., Kolobov V. V. Construction of a system for measuring the parameters of suspended surge arresters based on a microcontroller with wireless data transmission // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 53–58. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.006.

Подвесные ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН) являются неотъемлемой частью защиты оборудования систем электроснабжения от повреждений, которые могут быть вызваны внутренним и внешним перенапряжениями. Работа ограничителя основывается на вольт-амперной характеристике нелинейного характера. Если на устройство поступает большое напряжение, то электрическое сопротивление падает практически до нулевого значения. В итоге высоковольтный импульс номиналом в несколько киловольт направляется прямым ходом в заземляющую цепь [1].

Мониторинг за ОПН является важной задачей для обеспечения надежной работы электрических сетей. Наблюдение за их состоянием и своевременное обнаружение неисправностей или повреждений позволяет предотвратить возможные аварийные ситуации и обеспечить бесперебойную работу электрических систем [2]. В то же время подвесные ОПН, как правило, находятся в недоступном месте для обслуживающего персонала. Наиболее удобным наблюдением за ОПН являлось бы устройство с дистанционным управлением и автономным питанием, которого в идеальном случае хватало бы на половину или весь срок эксплуатации ОПН. Кроме того, за счёт мониторинга можно оптимизировать работу электрических систем, позволяя выявлять и устранять причины перенапряжений и повышать эффективность работы системы в целом.

Для осуществления мониторинга можно использовать системы на кристалле (SoC) [3]. SoC работают на основе сенсоров, которые могут обнаружить перенапряжения в сети и передать эту информацию на устройство оператору. Они могут быть запрограммированы для автоматического реагирования на перенапряжения. Такие системы на кристалле имеют ряд преимуществ перед другими типами систем мониторинга за ОПН:

- компактность, что позволяет установить его непосредственно на устройство;
- высокая точность и чувствительность, которая позволяет обнаруживать перенапряжения.

Системы на кристалле для мониторинга за ОПН в целом являются эффективным и надёжным способом защиты электронных устройств от повреждений, вызванных перенапряжениями в сети. Одним из примеров SoC, который может предоставлять необходимую информацию о срабатываниях устройства защиты от перенапряжений и его состоянии, является модуль CC2530, разработанный компанией Texas Instruments. Его технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики микроконтроллера CC2530  
Characteristics of the microcontroller CC2530

Параметры	Значения
Память	256 Кб
Частота ядра	32 МГц
Поддерживаемые стандарты беспроводной связи	IEEE 802.15.4, ZigBee
Потребление энергии	Режим сна: 1 мкА; режим передачи: 24,3 мА
Рабочая температура	min –40 °С; max +125 °С

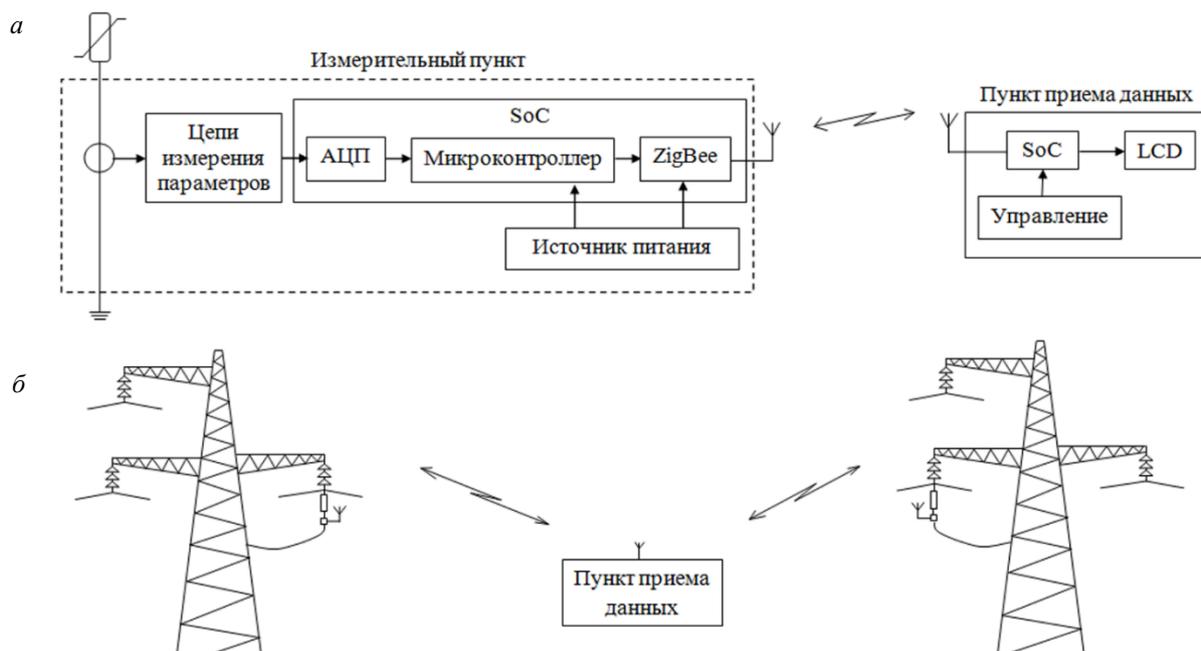
Главные преимущества CC2530 заключаются в следующем:

- низкое энергопотребление (всего 1 мкА в режиме сна с включённым таймером реального времени и 24,3 мА в режиме приёма-передачи данных);
- возможность работать на автономных источниках питания, что позволяет использовать их в различных условиях, в том числе в удалённых или труднодоступных местах;
- поддержка стандартов беспроводной связи;
- высокая точность и надёжность измерений, что позволяет получать более точную информацию о состоянии оборудования и предотвращать возможные поломки или аварии.

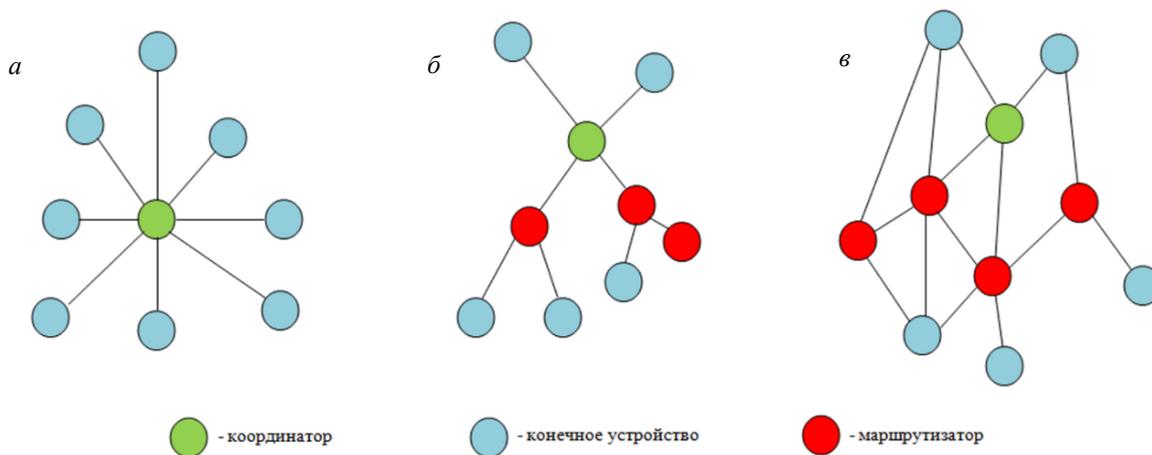
Для осуществления мониторинга за состоянием ОПН к нему подключается модуль CC2530, оснащённый восемью входными каналами, которые позволяют снимать показания. При этом модуль

выполняет функцию аналого-цифрового преобразователя (АЦП), преобразуя входные аналоговые сигналы в цифровой формат. После сбора показаний микроконтроллер обрабатывает данные, выполняя необходимые математические операции для получения конечных значений, например, вычисление среднего, максимального, минимального значения и т. д. Модуль СС 2530 использует протокол ZigBee для передачи данных на второй модуль СС2530, расположенный в пункте приёма данных. Для этого он генерирует пакеты данных, которые передаются через беспроводную сеть ZigBee. Пакеты данных содержат информацию о снятых показаниях, а также информацию о модуле СС2530. После получения данных в пункте приёма они обрабатываются специальным программным обеспечением. Это может включать в себя отображение графиков, анализ данных и т. д. (рис. 1).

Модуль СС2530 поддерживает стандарт IEEE 802.15.4, предназначенный для организации сетей стандарта ZigBee [4]. Для ZigBee определены три сетевые топологии (рис. 2).



**Рис. 1.** Передача показаний данных с ОПН: *а* — принципиальная схема; *б* — схема внешнего вида  
**Fig. 1.** Transmission of data readings from the surge arrester: *a* — the circuit diagram; *б* — the appearance diagram



**Рис. 2.** Сетевые топологии ZigBee: *а* — звезда; *б* — дерево; *в* — сетка  
**Fig. 2.** ZigBee network topologies: *a* — star; *б* — tree; *в* — mesh

Звезда (StarNetwork) представляет собой координатор, расположенный в центре сети, к которому напрямую подключены несколько конечных устройств. Взаимодействие между конечными устройствами непосредственно друг с другом невозможно. Основным недостатком данной топологии заключается в том, что передача и приём данных осуществляются через координатор, что может увеличить на него нагрузку и повлечь за собой перегрузку в сети.

Дерево (ClusterTreeNetwork) — это координатор, к которому подключено несколько маршрутизаторов и конечных устройств. Маршрутизаторы являются дочерним узлом координатора, но при этом могут иметь свои дочерние узлы, в качестве которых выступают конечные устройства или другие маршрутизаторы. Каждый дочерний узел может обмениваться информацией только со своим родителем. Недостаток данной топологии заключается в том, что в случае отключения родительского узла дочерние не могут взаимодействовать с другими узлами сети, следовательно, данные не дойдут до конечного пункта.

Сетка (MeshNetwork), как и дерево, состоит из координатора, нескольких маршрутизаторов и конечных устройств. Главное отличие данной сети от предыдущей заключается в том, что дочерние узлы могут обмениваться информацией между собой и это позволяет в случае сбоя пути предоставить альтернативные пути для достижения пакетов данных места назначения.

Основная особенность сети ZigBee заключается в том, что она при малом энергопотреблении поддерживает не только простые топологии сети (звезда, дерево), но и самовосстанавливающуюся сетку с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений [5].

Данная сеть имеет высокую степень надёжности и безопасности благодаря использованию процесса шифрования данных и механизма повторной передачи сообщений в случае потери связи. Также она имеет низкое энергопотребление, что позволяет устройствам работать на автономных источниках питания в течение длительного времени.

В качестве источника питания для модуля CC2530 можно использовать литий-тионилхлоридные (Li-SOCl<sub>2</sub>) источники питания, которые являются оптимальными для устройств с небольшим токопотреблением и с продолжительным сроком автономной работы [6]. Они приобрели свою популярность во многих сферах промышленной деятельности благодаря своим главным преимуществам:

- высокой энергетической ёмкости;
- длительному сроку службы;
- широкому диапазону рабочих температур, варьирующийся от –55 до +200 °С.

Для подбора наиболее эффективного источника питания к модулю CC2530 рассмотрим основные параметры наиболее популярных элементов питания, которые производятся компанией EEMB (табл. 2).

Таблица 2

Параметры литий-тионилхлоридных источников питания от компании EEMB  
Parameters of EEMB lithium-thionylchloride power supplies

Модель	Номинальное напряжение, В	Номинальная ёмкость, мА·ч	Стандартный ток разряда, мА	Диапазон рабочей температуры, °С
ER14505	3,6	2400	2	от –55 до +85
ER14505S		1600	100	от –20 до +125
ER14505M		1800	10	от –55 до +85

Сравнивая представленные модели, мы остановили свой выбор на ER14505, что связано с его наиболее высокой ёмкостью. Использование такого источника питания для модуля CC2530 позволит обеспечить надёжное и длительное питание устройства, не требующее частой замены.

Модуль CC2530 — это высокоэффективный беспроводной модуль. Один из его ключевых параметров — энергопотребление, которое является важным фактором для выбора источника питания,

чтобы длительность срока эксплуатации была как можно больше. Для оценки энергопотребления рассматривался элемент питания модели ER14505, выбранный ранее. Передача данных с модуля осуществляется каждые 5 мин по 0,1 с. В течение этого времени происходит уточнение точного времени, передача накопленной информации и приём команды, например, на внеплановое измерение токов утечки ОПН. Согласно документации от производителя модуля CC2530, потребление энергии в режиме передачи данных составляет 24 мА, а в спящем режиме 1 мкА. Таким образом, за год он потребляет 79 мА·ч (в активном режиме — 70 мА·ч, в режиме сна — 9 мА·ч).

Для определения срока эксплуатации прибора на автономном источнике питания необходимо учитывать не только потребление энергии самого модуля, но и его саморазряд. Ёмкость ER14505 — 2400 мА·ч, напряжение — 3,6 В. Его саморазряд составляет около 1 % в год, что означает, что за год он потеряет 24 мА·ч. С учетом саморазряда и потребления энергии модулем CC2530 за год общее энергопотребление составит около 103 мА·ч. Таким образом, при использовании модуля CC2530 с источником питания ER14505 для передачи данных каждые 5 мин по 0,1 с можно ожидать, что его срок службы составит около 23 лет (рис. 3).



**Рис. 3.** Диаграмма потребляемой энергии за 23 года эксплуатации источника питания  
**Fig. 3.** Diagram of energy consumption over 23 years of operation

### Заключение

Произведённый анализ показывает, что на базе микроконтроллера CC2530 с модулем ZigBee можно построить систему регистрации параметров токов утечки и импульсов тока, протекающего через ОПН. Произведён расчёт возможности построения устройства с эксплуатацией на протяжении более 20 лет от одного автономного источника питания. Возможности системы позволяют организовать различные сетевые топологии, которые могут отличаться для разных случаев размещения устройств регистрации. Непрерывная диагностика импульсных токов, проходящих через ОПН, позволит внести вклад в анализ молниезащиты, тем самым выявляя самые уязвимые и самые бесполезные места установки ОПН.

### Список литературы

1. Ограничители перенапряжения: назначение, устройство и принцип действия // Электротовары: сайт. URL: <https://elektro-tovars.ru/novosti/ogranichiteli-perenapryazheniya.html> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Евстигнеев А. В., Колобов В. В. Способы построения устройства для контроля состояния подвесных ОПН // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 8 (17). С. 98–101. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.98-101. EDN: AYZBCP.

3. Колобов В. В., Баранник М. Б., Ивонин В. В. Опыт эксплуатации устройств регистрации импульсных токов в нелинейных ограничителях перенапряжений // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 3. С. 39–49. doi:10.18721/JEST.27304. EDN: ELHUJG.
4. Ильин П., Пушкарев О. CC2530 — новый ZigBee-трансивер для широкого спектра применений // *Компоненты и технологии*. 2009. № 10 (99). С. 98–100. EDN: MTFTBX.
5. ZigBee // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Zigbee> (дата обращения: 15.05.2023).
6. Литий-тионилхлоридные источники питания (Li-SOCl<sub>2</sub>) // KupiFonar.kz: сайт. URL: <https://www.kupifonar.kz/wiki/lisocl2-batteries/> (дата обращения: 15.05.2023).

## References

1. Ogranichiteli perenapryazheniya: naznachenie, ustrojstvo i princip dejstviya [Overvoltage limiters: purpose, device and principle of operation]. (In Russ.). Available at: <https://elektrotovars.ru/novosti/ogranichiteli-perenapryazheniya.html> (accessed 15.05.2023).
2. Evstigneev A. V., Kolobov V. V. Sposoby postroeniya ustrojstva dlya kontrolya sostoyaniya podvesnykh OPN [Methods of constructing a device for monitoring the state of suspended surge arresters]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2018, Vol. 9, No. 8 (17), pp. 98–101. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.98-101. EDN: AYZBCP.
3. Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Opyt ekspluatatsii ustrojstv registratsii impul'snykh tokov v nelineynykh ogranichitelyakh perenapryazheniy [Experience in operating devices for recording pulsed currents in non-linear surge arresters]. *Materialovedenie. Energetika* [Materials science. Power engineering], 2021, Vol. 27, No. 3, pp. 39–49. (In Russ.). doi:10.18721/JEST.27304. EDN: ELHUJG.
4. Il'in P., Pushkarev O. CC2530 — novyy ZigBee-transiver dlya shirokogo spektra primeneniya [CC2530 is a new ZigBee transceiver for a wide range of applications]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2009, No. 10 (99), pp. 98–100. (In Russ.). EDN: ELHUJG.
5. ZigBee. Wikipedia. (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Zigbee> (accessed 15.05.2023).
6. Litij-tionilhloridnye istochniki pitaniya [Lithium-thionyl chloride power supplies]. (In Russ.). Available at: <https://www.kupifonar.kz/wiki/lisocl2-batteries/> (accessed 15.05.2023).

## Информация об авторах

**М. А. Лазарева** — инженер;

**В. В. Колобов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

## Information about the authors

**M. A. Lazareva** — Engineer;

**V. V. Kolobov** — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 621.311  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КОНТУРЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

**Виталий Валентинович Колобов<sup>1</sup>, Максим Борисович Баранник<sup>2</sup>,  
Виктор Владимирович Ивонин<sup>3</sup>**

*<sup>1,2,3</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия*

*<sup>1</sup>v.kolobov@ksc.ru*

*<sup>2</sup>m.barannik@ksc.ru*

*<sup>3</sup>v.ivonin@ksc.ru*

### Аннотация

На действующей подстанции 150 кВ были проведены экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в контуре заземления. Полученные в ходе эксперимента скорости распространения волн находятся в диапазоне  $50\text{--}100\cdot 10^6$  м/с. Таким образом, полученная скорость распространения волны по контуру заземления подстанции в несколько раз меньше скорости света, что кардинально может поменять подходы проектирования заземляющих устройств с точки зрения молниезащиты.

### Ключевые слова:

заземление, контур заземления подстанции, электромагнитные волны, генератор импульсов с индуктивным накопителем, гальваническая развязка

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Колобов В. В., Баранник М. Б., Ивонин В. В. Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в контуре заземления подстанции // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 59–65. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007.

Original article

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION ON A SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

**Vitalii V. Kolobov<sup>1</sup>, Maksim B. Barannik<sup>2</sup>, Viktor V. Ivonin<sup>3</sup>**

*<sup>1,2,3</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia*

*<sup>1</sup>v.kolobov@ksc.ru*

*<sup>2</sup>m.barannik@ksc.ru*

*<sup>3</sup>v.ivonin@ksc.ru*

### Abstract

Experimental investigations of the propagation of electromagnetic waves in the grounding wire were carried out at the operating 150 kV substation. The wave propagation velocities obtained during the experiment are in the range of  $50\text{--}100\cdot 10^6$  m/s. Thus, the obtained wave propagation velocity along the grounding grid of the substation is several times less than the speed of light, which can radically change the design approaches of the grounding in term of lightning protection.

### Keywords:

grounding, substation grounding grid, electromagnetic waves, pulse generator with inductive storage, galvanic isolation

### Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### For citation:

Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental investigation of electromagnetic wave propagation on a substation grounding system // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 59–65. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.007.

## Введение

Чтобы соответствовать законодательным и нормативным требованиям, заземляющие устройства (ЗУ) подстанции должны подвергаться испытаниям после монтажа и установки, а затем повторно в ходе технического обслуживания каждые несколько лет [1]. Испытания необходимы для того, чтобы убедиться, что во время короткого замыкания на землю персонал не подвергается никаким опасностям, а телекоммуникационное оборудование не будет повреждено. Величина повышения потенциала земли и связанные с ним опасности напрямую связаны с компоновкой, токами короткого замыкания и сопротивлением всей системы заземления [2].

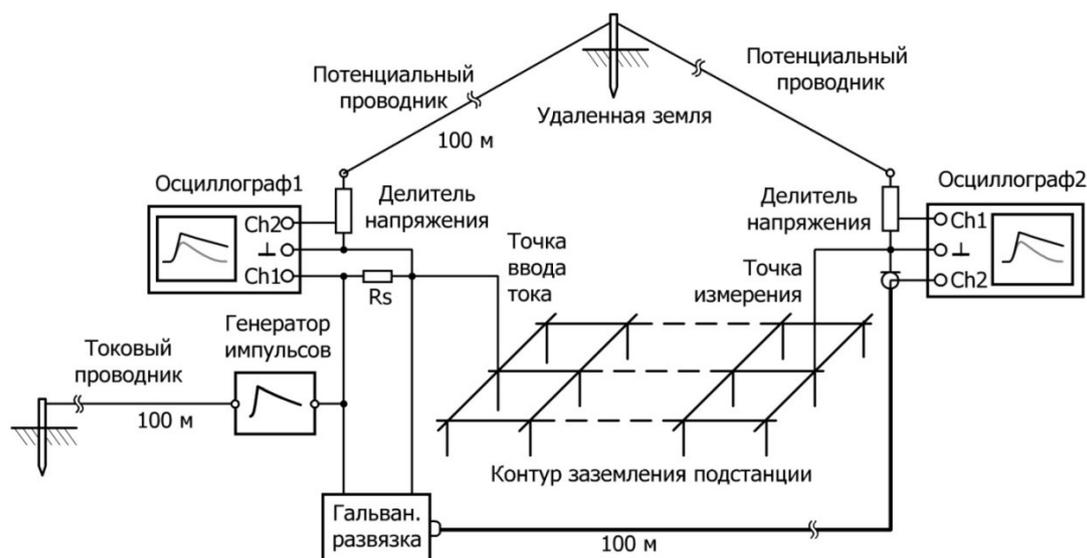
Для контроля определяют полное сопротивление ЗУ и потенциалы замыкания на землю на защитных ограждениях, высоковольтных установках. Также проводят исследования целостности контура заземления, элементы которого могут со временем подвергаться коррозии [3, 4].

Когда ток молнии стекает с заземлителя в землю, область заземлителя, с которой осуществляется растекание тока, изначально невелика вокруг точки ввода тока молнии и увеличивается со скоростью, которая зависит от распространения электромагнитного поля в земле [5]. В течение этого периода потенциал на элементах заземлителя повышается неравномерно и может достигать больших значений вблизи точки ввода тока [6–9], что, в свою очередь, может привести к перенапряжениям на оборудовании и во вторичных цепях.

Одной из причин данного исследования послужила авария трансформатора на одной из подстанций, вызванная приходом по линии электропередачи грозовой волны, при этом ОПН всех трех фаз, защищающие трансформатор, были исправны.

## Описание эксперимента

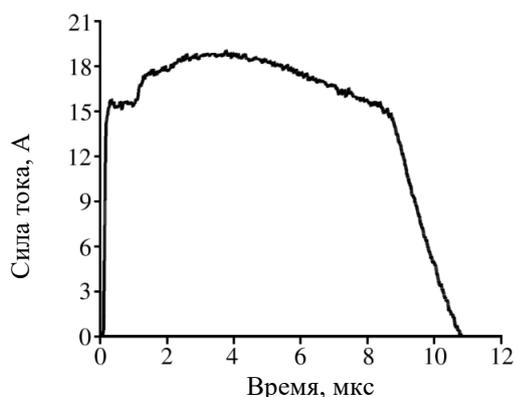
Эксперимент проводился на ОРУ распределительной подстанции 150 кВ. Схема проведения эксперимента по исследованию скорости распространения волны по контуру заземления подстанции приведена на рис. 1. Генераторная часть установки включает в себя генератор импульсов тока, подключаемый к контуру заземления подстанции в стационарной точке, осциллограф для контроля формы тока и измерения потенциала заземлителя в точке введения тока, а также устройство формирования импульса начала времени (zero-time pulse), фронт которого совпадает с фронтом вводимого тока. Рост потенциала заземлителя в точке введения тока измеряется известным методом падения напряжения относительно удаленной земли [10].



**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента по исследованию скорости распространения волны по контуру заземления подстанции

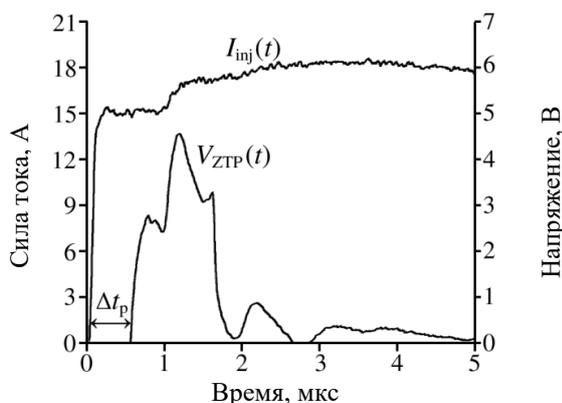
**Fig. 1.** The scheme of the experiment for measuring the surge propagation characteristics of substation grounding grid

В эксперименте использовался генератор импульсов тока на основе индуктивного накопителя энергии. Генератор был разработан для исследования переходного сопротивления [11] локальных ЗУ опор линий электропередачи и молниеотводов. Схема и работа генератора подробно рассмотрены в работах [12, 13].



**Рис. 2.** Осциллограмма генерируемого импульса тока  
**Fig. 2.** The injected current waveform

удаленного потенциала. Как видно из рис. 1, в генераторной и измерительной части установки был использован один общий электрод удаленного потенциала, установленный за пределами ОРУ подстанции на расстоянии 100 м от генератора импульсов тока. Напряжение с делителя напряжения подавалось на первый вход осциллографа, на второй подавалось напряжение импульса начала времени, соответствующее фронту генерируемого импульса тока (рис. 3). Измерение задержки распространения волны по контуру заземления подстанции определялось относительно фронта импульса начала времени, приходящего от генератора тока по коаксиальному кабелю длиной 100 м.



**Рис. 3.** Осциллограммы генерируемого импульса тока  $I_{inj}(t)$  и импульса начала времени  $V_{ZTP}(t)$ , измеренные на конце коаксиального кабеля длиной 100 м

**Fig. 3.** Waveforms of injected current  $I_{inj}(t)$  and zero-time pulse  $V_{ZTP}(t)$  measured at the end of 100 m length coaxial cable

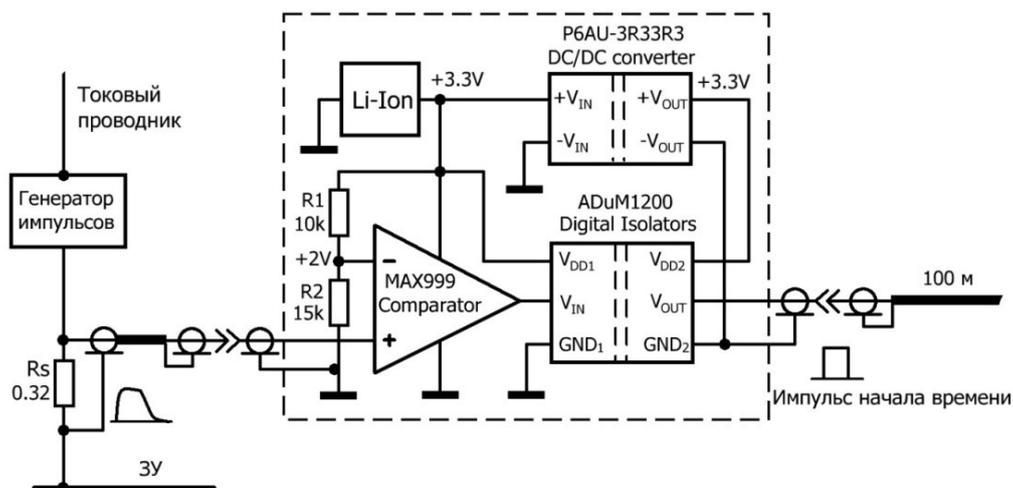
компаратора формируется прямоугольный импульс амплитудой 3,3 В. Амплитуда опорного напряжения 2 В определяется номиналами резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , которые образуют делитель напряжения. Импульс с выхода компаратора подается на вход микросхемы цифрового изолятора, выполненной на основе импульсного трансформатора. Максимально допустимое напряжение изолирующего барьера микросхемы составляет 5 кВ, а задержка передачи сигнала не превышает 20 нс.

Генератор с индуктивным накопителем формирует импульс тока (рис. 2) с очень коротким фронтом (не более 100 нс). Такая форма тока содержит широкий спектр частот, совпадающий с частотными компонентами волны перенапряжения на линии электропередачи от вторичных ударов молнии [14] и компонентами волны перенапряжения при перекрытии изоляции [15].

Измерительная часть экспериментальной установки предназначена для определения потенциала ЗУ относительно удаленной земли в выбранных измерительных точках. Измерение потенциала также выполнялось по методу падения напряжения. Измерительная часть включает второй двухканальный осциллограф, делитель напряжения, проводник потенциальный, электрод

Для обеспечения гальванической развязки между коаксиальным кабелем, подключенным к осциллографу измерительной части экспериментальной установки, и цепями протекания выходного тока генератора импульсов было разработано устройство гальванической развязки. Функциональная схема устройства приведена на рис. 4.

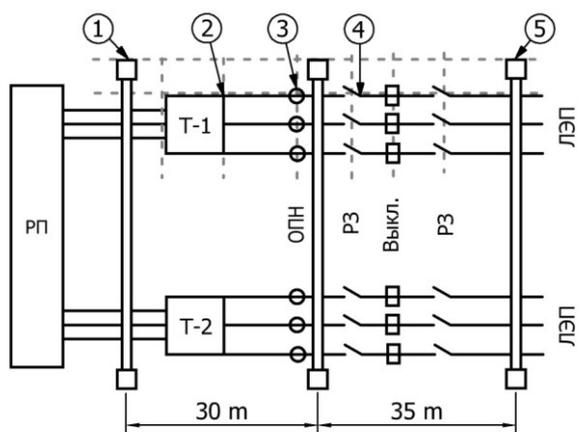
Импульс начала времени формируется из падения напряжения на резистивном шунте  $R_s$ , который также используется как датчик тока для контроля формы и амплитуды генерируемого тока (см. рис. 1). Напряжение с шунта  $V_{Rs}(t)$ , повторяющее форму генерируемого тока  $I_{inj}(t)$ , одновременно подается на один из каналов осциллографа  $I$  и на измерительный вход компаратора устройства гальванической развязки. На интервале времени, пока амплитуда напряжения  $V_{Rs}(t)$  превышает напряжение 2 В, на опорном входе компаратора, на выходе



**Рис. 4.** Функциональная блок-схема устройства гальванической развязки  
**Fig. 4.** Functional block diagram of the galvanic isolation unit

Первичные цепи устройства гальванической развязки питаются от литий-ионного аккумулятора напряжением 3,3 В. Для питания вторичных гальванически изолированных цепей цифрового изолятора используется изолированный DC/DC-преобразователь. Благодаря использованию высокоскоростного компаратора и цифрового изолятора общая задержка распространения сигнала между входом и выходом блока гальванической развязки не превышает 25 нс. Время нарастания импульса начала времени составляет 100–150 нс.

Перед проведением эксперимента была определена задержка распространения импульса начала времени по коаксиальному кабелю  $\Delta t_p$  (см. рис. 3), для чего конец кабеля был подключен ко второму входу осциллографа 1 экспериментальной установки. Как видно из рис. 3, задержка распространения составила 0,55 мкс, что соответствует скорости распространения волны в коаксиальном кабеле, лежащем на земле, —  $\sim 180 \cdot 10^6$  м/с. Рис. 3 также показывает, что форма импульса не совпадает с меандром. Этот эффект объясняется тем, что через некоторое время после формирования импульса

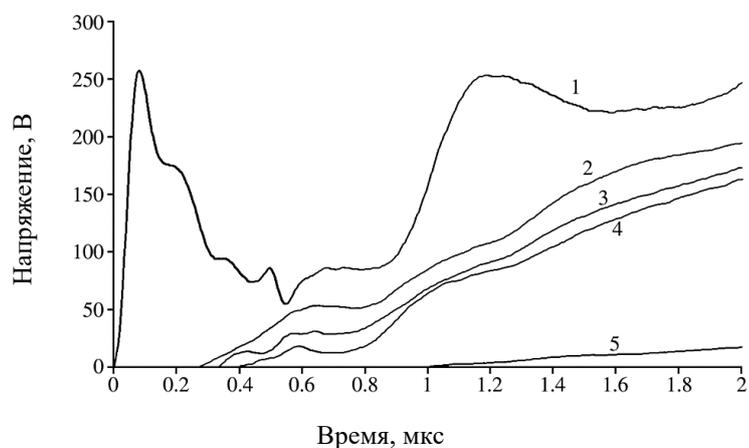


**Рис. 5.** Схема расположения точек измерения на подстанции  
**Fig. 5.** The location of the measuring points at the substation

начала времени падение напряжения на резистивном шунте  $R_s$  превышало напряжение +3,3 В питания первичных цепей устройства и достигало +5 В, чем искажалась форма импульса на выходе микросхемы цифрового изолятора. Однако этот эффект не имел значения, так как форма фронта импульса начала времени, важная при относительных измерениях временной задержки, оставалась неискаженной и позволяла проводить эксперимент и не снижала точности результатов.

На рис. 5 приведено расположение точек измерения на подстанции. Точка 1 является местом подключения генератора импульсных токов к контуру заземления подстанции. Выходы генератора

аппаратов как можно ближе к поверхности земли. Для обеспечения надежного электрического контакта с шинами заземления использовались специально разработанные струбины.



**Рис. 6.** Осциллограммы напряжения, измеренные в точках 1–5  
**Fig. 6.** Voltage waveforms measured at points 1–5

тока записывалась вторым каналом осциллографа 1 одновременно с записью формы вводимого тока первым каналом осциллографа, осциллограмма не требовала дополнительной обработки. На рис. 6 приведены начальные участки импульсов напряжения для всех точек измерения. Начало оси времени соответствует началу импульса вводимого тока. Скорости распространения волны, измеренные для точек 2–5, лежат в диапазоне  $50\text{--}100 \cdot 10^6$  м/с. Таким образом, полученные скорости распространения волн в контуре заземления находящейся в эксплуатации подстанции в несколько раз меньше скорости света.

Наибольший интерес представляет импульс, полученный в самой дальней точке 5, так как точно известно расстояние от места введения тока в контур заземления до этой точки и, кроме того, можно предположить, что существует прямой проводник между точками 1 и 5. Из рис. 6 видно, что скорость прохождения волны от точки 1 до точки 5 составляет  $65$  м/мкс, или  $65 \cdot 10^6$  м/с. Полученные экспериментальные значения хорошо коррелируются с аналогичными опытами, проведенными для заглубленных проводников [16], находящихся в грунтах со схожими параметрами и результатами математического моделирования [17] для контура заземления, имеющего аналогичные размеры, в том числе и размеры ячеек, и находящиеся в грунтах с удельным сопротивлением  $1000\text{--}2000$  Ом·м.

## Заключение

При правильном выборе ОПН по классу напряжения и соблюдении расчетного расстояния защищенного подхода без учета скорости распространения волны тока по ЗУ на защищаемом оборудовании, в частности на трансформаторе, могут возникать перенапряжения, превышающие остающееся напряжение.

Полученные в ходе эксперимента результаты совпадают с расчетными результатами скорости волны для грунтов аналогичного удельного сопротивления. На наш взгляд, надо уменьшать локальное импульсное сопротивление в месте подключения ОПН к заземляющему контуру подстанции, для чего надо делать меньше ячейки, то есть увеличивать число вертикальных электродов именно в месте заземления ОПН.

При проведении расчетов установки ОПН, защищающих подстанцию от волн перенапряжений, набегающих с ЛЭП, надо учитывать скорость распространения волны тока по контуру заземления подстанции.

### Список источников

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок: [СТО 56947007-29.130.15.105-2011]: стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (дата обращения: 21.04.2023).
2. Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental Investigation of Surge Propagation Characteristics on a Substation Grounding System // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2096. P. 012113.
3. Об утверждении правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 12.08.2022 № 811 // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (дата обращения: 21.04.2023).
4. Ma Y., Karady G. Investigating grounding grid integrity based on the current injection method 41st North American Power Symposium. 2009. P. 1–5. doi:10.1109/NAPS.2009.5484048.
5. Grcev L, Markovski B. Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, No. 2. P. 1183–1192. doi:10.1109/TPWRD.2020.3003427.
6. Grcev L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, No. 3. P. 1692–1699. doi:10.1109/TPWRD.2010.2102779.
7. Gupta B., Thapar B. Impulse Impedance of Grounding Grids // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1980. Vol. PAS-99, No. 6. P. 2357–2362. doi:10.1109/TPAS.1980.319800.
8. Grcev L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 815–823. doi:10.1109/61.489339.
9. Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization / R. Zeng [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, No. 2. P. 667–675. doi:10.1109/TPWRD.2007.915194.
10. Visacro S. The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60, No. 5. P. 1602–1605. doi:10.1109/TEMC.2017.2788565.
11. Tong X., Dong X., Tan B. High current field test of impulse transient characteristics of substation grounding grid // The Journal of Engineering 2018–2021. 2019. doi:10.1049/joe.2018.8826.
12. A current source with an inductive energy storage for measuring pulse impedances of grounding connections / V. V. Kolobov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57 (5). P. 572–578. doi:10.1134/s0020441214040162.
13. Kolobov V., Barannik M. Portable system for measuring the grounding resistance of power transmission poles using rapidly increasing current pulses // International Multi-conference 2020 on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. P. 1–6.
14. Anderson R. B., Eriksson A. J. Lightning parameters for Engineering applications Electra. 1980. P. 65–102.
15. Экспериментальные исследования пробоя гирлянды изоляторов воздушных линий электропередачи / В. В. Ивонин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып. 18. 2019. № 5 (10). С. 130–136.
16. Basic investigation of wave propagation characteristics on an underground naked conductor / A. Ametani [et al.] // Proc. Int. Conf. Elect. Eng. 2002. P. 2141–2146.
17. Sekioka S., Lorentzou M., Hatziargyriou N. A simplified formula of surge characteristics of a long grounding conductor // Proc. of Intern. Conf. on Power Systems Transients. New Orleans, 2003.

### References

1. *Metodicheskie ukazaniya po kontrolju sostojanija zazemljajushhih ustrojstvj elektroustanovok, STO 56947007-29.130.15.105-2011* [Methodological guidelines for monitoring the condition of grounding devices of electrical installations]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (accessed 21.04.2023).
2. Kolobov V. V., Barannik M. B., Ivonin V. V. Experimental Investigation of Surge Propagation Characteristics on a Substation Grounding System. J. Phys.: Conf. Ser., 2021, Vol. 2096, pp. 012113.
3. *Prikaz Ministerstvaja energetiki Rossijskoj Federacii ot 12 avgusta 2022 g. № 811 «Ob utverzhdenii pravil tehničeskoj ekspluatacij elektroustanovok potrebitelej električeskoj energii»* [About

- the approval of the rules of technical operation of electrical installations of consumers of electric energy]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (accessed 21.04.2023).
4. Ma Y., Karady G. Investigating grounding grid integrity based on the current injection method 41st North American Power Symposium, 2009, pp. 1–5. doi:10.1109/NAPS.2009.5484048.
  5. Grcev L., Markovski B. Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, Vol. 36, No. 2, pp. 1183–1192. doi:10.1109/TPWRD.2020.3003427.
  6. Grcev L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, Vol. 26, No. 3, pp 1692–1699. doi:10.1109/TPWRD.2010.2102779.
  7. Gupta B., Thapar B. Impulse Impedance of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2357–2362. doi:10.1109/TPAS.1980.319800.
  8. Grcev L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, Vol. 11, No. 2, pp. 815–823. doi:10.1109/61.489339.
  9. Zeng R., Gong X., He J., Zhang B., Gao Y. Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 667–675. doi:10.1109/TPWRD.2007.915194.
  10. Visacro S. The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, Vol. 60, No. 5, pp. 1602–1605. doi:10.1109/TEMC.2017.2788565.
  11. Tong X., Dong X., Tan B. High current field test of impulse transient characteristics of substation grounding grid. The Journal of Engineering 2018–2021, 2019. doi:10.1049/joe.2018.8826.
  12. Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N., Kuklin D. V. A current source with an inductive energy storage for measuring pulse impedances of grounding connections. Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57 (5), pp. 572–578. doi:10.1134/s0020441214040162.
  13. Kolobov V., Barannik M. Portable system for measuring the grounding resistance of power transmission poles using rapidly increasing current pulses. International Multi-conference 2020 on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1–6.
  14. Anderson R. B., Eriksson A. J. Lightning parameters for Engineering applications Electra, 1980, pp. 65–102.
  15. Ivonin V. V., Danilin A. N., Efimov B. V., Karpov A. S., Klimov A. A. Jeksperimental'nye issledovanija probuja girlijandy izoljatorov vozdušnyh liniij elektroperedachi [Experimental investigations of high voltage power transmission line insulators breakdown]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre], 2019, No. 5, pp. 130–136. (In Russ.).
  16. Ametani A., Nayel M., Sekioka S., Sonoda T. Basic investigation of wave propagation characteristics on an underground naked conductor Proc. Int. Conf. Elect. Eng., 2002, pp. 2141–2146.
  17. Sekioka S., Lorentzou M., Hatziargyriou N. A simplified formula of surge characteristics of a long grounding conductor. Proc. of Intern. Conf. on Power Systems Transients, New Orleans, 2003.

#### *Информация об авторах*

**В. В. Колобов** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

**М. Б. Баранник** — научный сотрудник;

**В. В. Ивонин** — научный сотрудник.

#### *Information about the authors*

**V. V. Kolobov** — PhD (Engineering), Leading Researcher;

**M. B. Barannik** — Researcher;

**V. V. Ivonin** — Researcher.

Статья поступила в редакцию 05.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 05.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 551.501.83  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЛНИИ НА ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**Антон Владимирович Бурцев**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, a.burtsev@ksc.ru*

### **Аннотация**

Представлены примеры практического применения метода расчета уровня воздействия молний на воздушные линии электропередачи. Метод основан на расчете расстояний между координатами молний и опор воздушных линий. Апробация метода проведена на воздушных линиях Мурманской обл. Предложенный метод представляет интерес для электросетевых компаний, поскольку позволяет выявить наиболее уязвимые для молний участки линий электропередачи.

### **Ключевые слова:**

молниезащита, грозопеленгация, воздушная линия электропередачи, Арктическая зона

### **Благодарности:**

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### **Для цитирования:**

Бурцев А. В. Практическое применение метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 66–72. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008.

Original article

## **PRACTICAL APPLICATION OF THE METHOD FOR CALCULATING LIGHTNING IMPACT LEVELS ON OVERHEAD POWER LINES**

**Anton V. Burtsev**

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, a.burtsev@ksc.ru*

### **Abstract**

The article presents examples of the practical application of the method for calculating the level of lightning effects on overhead power lines. The method is based on calculation of distances between coordinates of lightning and overhead line supports. The method was tested on overhead lines of Murmansk region. The proposed method is of interest for power grid companies, as it allows identifying the most vulnerable sections of power lines to lightning.

### **Keywords:**

lightning protection, lightning detection, overhead power lines, Arctic zone

### **Acknowledgments:**

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### **For citation:**

Burtsev A. V. Practical application of the method for calculating lightning impact levels on overhead power lines // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 66–72. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008.

### **Введение**

Стабильность электроснабжения потребителей требует повышения устойчивости линий электропередачи (ЛЭП) к воздействию грозových перенапряжений. В случае повреждения, а тем более отключения воздушной линии (ВЛ) вследствие удара молнией в ее элементы потребуется проведение целого комплекса мероприятий, связанных с поиском и устранением повреждений. При обрыве фазного провода важно быстро и точно определить место повреждения. Для этого успешно применяются специальные устройства [1–3], которые размещают на подстанциях. Если же полное

отключение линии не произошло, то успешное срабатывание автоматического повторного включения (АПВ) не исключает возникновения каких-либо повреждений на элементах линии вследствие протекания большого тока молнии и сопровождающего тока короткого замыкания. Помимо арматуры и тросов, повреждения часто получают изоляторы ВЛ. Это может быть трещина, потеря части или полное разрушение изолятора. Такие повреждения обычно обнаруживаются при осмотре линии с использованием оптических методов контроля с помощью электронно-оптических дефектоскопов ультрафиолетового диапазона [4–5], тепловизоров и камер высокого разрешения [4]. Частота осмотра ЛЭП регламентируется нормативным документом ПТЭЭП [6] и «должна выполняться не реже 1 раза в год», а внеочередные осмотры должны проводиться «...после отключения ВЛ релейной защитой и неуспешного автоматического повторного включения, а после успешного повторного включения — по необходимости». При наиболее удачных обстоятельствах ВЛ может выдержать за сезон множество ударов молний, которые не приведут к отключению, либо работа АПВ будет успешной. Таким образом, «необходимость» так и не наступит до периодического осмотра, а вероятные повреждения накопятся и будут развиваться. Поэтому к моменту наступления периодического или внеочередного осмотра ЛЭП было бы полезно иметь план линии с указанием ее наиболее грозопоражаемых участков.

### Материалы и методы

За основу исследования взят метод расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи, предложенный ранее авторами [7]. Метод был применен к воздушным линиям Мурманской обл. В этом регионе насчитывается более 260 линий с классами напряжения 35, 110, 150 и 330 кВ. Регион является частью Арктической зоны России и имеет умеренно холодный климат с очень низкой грозовой активностью на севере и низкой грозовой активностью на юге.

В предложенном методе используется информация о координатах ударов молний в землю. В настоящее время функционируют региональные и глобальные системы грозопеленгации [8–15], в том числе коммерческие (ГПС Алвес, Вея-МР, WWLLN, NLDN (Vaisala), Euclid, Boltek, GLN (TOA Systems) и др.) и любительские (Blitzortung). К коммерческим зарубежным и российским системам грозопеленгации авторы доступа не имеют. Грозопеленгационная система Росгидромета, к сожалению, не позволяет свободно оперировать ее данными, поэтому анализ молний в Мурманской обл. проводился с помощью сети обнаружения молний Blitzortung. Мурманская обл. была выбрана из-за ее расположения в зоне надежного обнаружения молний сетью Blitzortung, в отличие от других регионов России. Сеть Blitzortung функционирует с 2008 г., но достоверные данные по Мурманской обл. доступны только с 2015 г., что заметно ограничивает возможности исследования гроз в этом регионе с использованием данной сети. Поэтому в данной работе будут использованы данные о молниях за период с 2016 по 2022 гг.

Информация о ЛЭП была получена от сетевых компаний Мурманской обл. Набор данных содержит координаты 266 воздушных линий и их отпаяк различных классов напряжения. Информация является служебной, по этой причине в работе некоторые данные из набора будут представлены в обезличенном виде и без точной привязки к местности, что, однако, не помешало нам в полной мере продемонстрировать опыт практического применения метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи.

Результаты работы являются частью веб-проекта по анализу аварийности ЛЭП вследствие ударов молний и информированию о попадании молний в линии электропередачи в режиме реального времени. Проект содержит базу данных (БД) воздушных линий, электрических станций и подстанций Мурманской обл., а также подстанций других областей Северо-Западного федерального округа. Информация о каждом зарегистрированном разряде поступает с серверов сети грозопеленгации Blitzortung. После записи информации о разряде в БД выполняется вычисление возможного радиуса зоны действия разряда на основе параметра максимальной ошибки определения координат этого разряда. Последующий анализ каждого разряда определяет географические координаты опор ЛЭП, которые оказались в зоне действия разряда. В случае обнаружения таких опор в БД вносится запись о произошедшем событии, в ней указываются все попавшие под воздействие молнии объекты. После этого владельцу линии или подстанции направляется информационное сообщение о событии.

Проект построен на стеке технологий Go, MySQL, JS, R с использованием картографических и топографических сервисов.

## Результаты

Одной из поставленных задач было рассчитать и подготовить маршрутный план воздушной линии, где будут явно показаны участки, чаще других попадающие в зону действия молний. Далее представлен алгоритм формирования такого плана ЛЭП.

В работе алгоритма задействована математическая функция оценки интенсивности воздействия молнии на опоры ЛЭП, подробно описанная в работе [7]. Под интенсивностью воздействия молнии на опору принимается значение, равное единице при прямом попадании в опору и уменьшающееся до нуля по мере приближения молнии к границе буферной зоны ЛЭП. Исходными данными для функции являются координаты опор ЛЭП, координаты зарегистрированных разрядов и их радиус поражения. За выбранный период формируется матрица расстояний  $D$  между всеми разрядами и всеми опорами ЛЭП. Полученная матрица содержит количество строк, соответствующее количеству молний, а количество столбцов соответствует количеству опор.

Следующий шаг — вычисление матрицы разности  $E$  между размером буфера и матрицей расстояний. Далее все элементы матрицы  $E$ , которые меньше нуля, принимаются как не оказывающие влияния на опору ЛЭП, эти значения приравниваются к нулю. Затем происходит вычисление искомого вектора интенсивности  $e$  путем суммирования строк матрицы  $E$ , где строки матрицы  $E$  делятся на размер буфера  $b$ . Длина этого вектора равна количеству опор ЛЭП.

Для заранее заданного радиуса буферной зоны линии вычисляется вектор интенсивности  $e_{ВЛ}$ . Исходя из максимального значения элемента в полученном векторе, рассчитывается будущая цветовая палитра для отображения ВЛ на карте. ЛЭП разбивается по пролетам на отрезки, цвет которых будет соответствовать уровню интенсивности из вектора  $e_{ВЛ}$  для предшествующей пролету опоры. Далее для нового слоя рассчитывается полигон, визуализирующий буферную зону ВЛ. Отдельным слоем записываются окружности, описывающие зоны разрядов молний. Все полученные слои накладываются на карту местности. Результат работы алгоритма, реализованный в веб-проекте, показан на рис. 1.

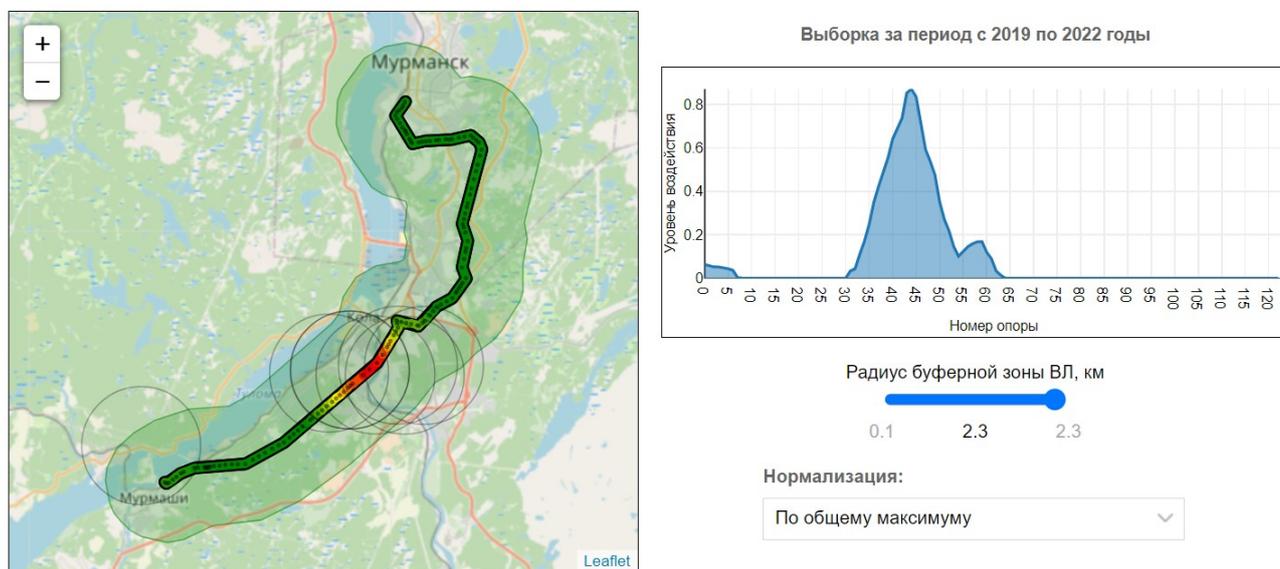


Рис. 1. Работа алгоритма на примере одной из ВЛ, расположенной на севере Мурманской обл.

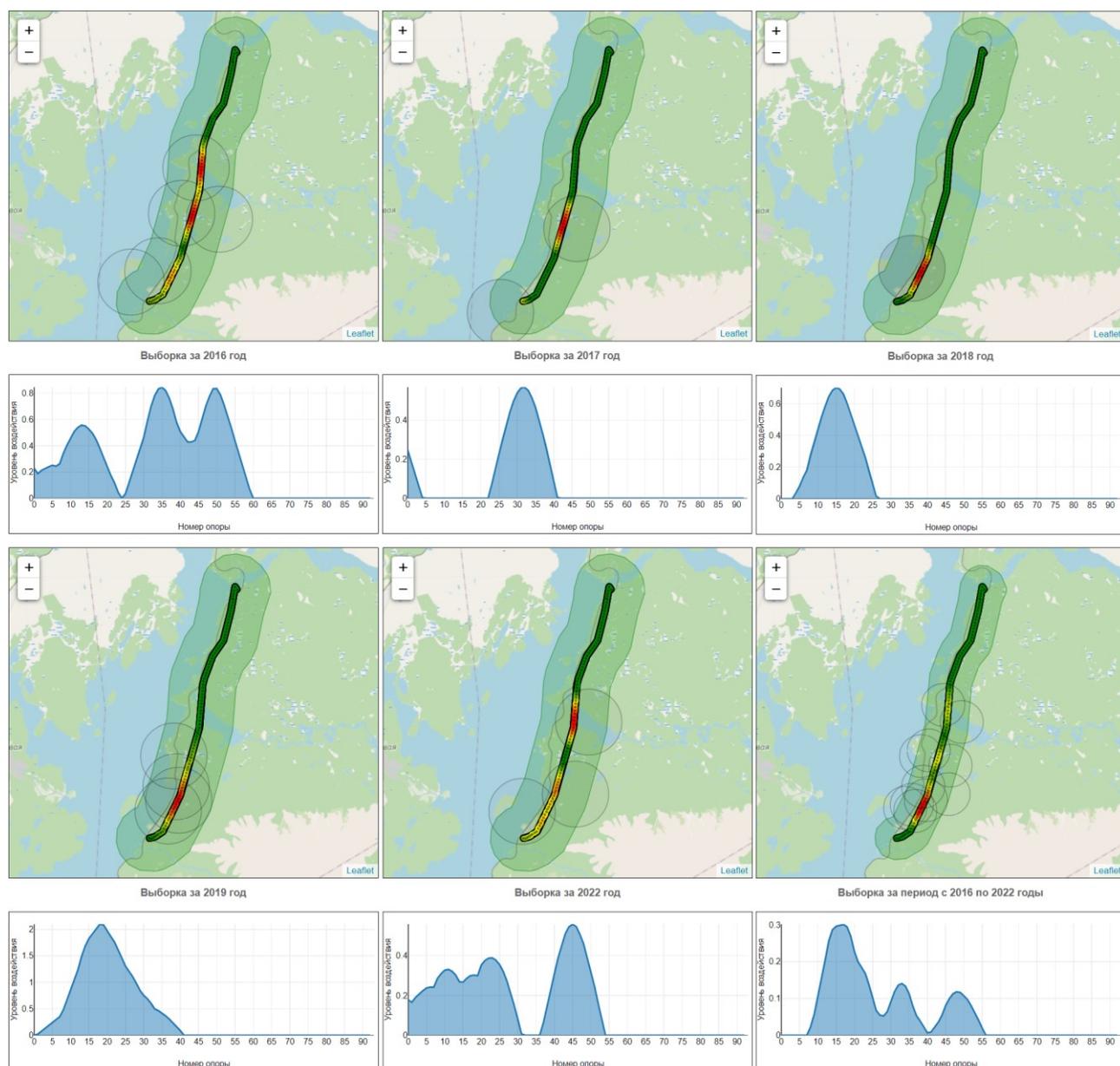
Fig. 1. Operation of the algorithm using one of the overhead lines in the north of the Murmansk region as an example

Слева на рисунке план ВЛ, где видны наиболее поражаемые участки. Контур вокруг ВЛ — буферная зона линии, окружности — разряды молний, попавшие в заданную буферную зону ВЛ.

Справа показано графическое представление вектора интенсивности  $e$  для заданного радиуса буферной зоны воздушной линии.

### Обсуждение

С помощью представленного алгоритма был проведен анализ грозопоражаемости всех воздушных линий Мурманской обл., занесенных в БД. Анализ выявил несколько интересных результатов. Например, часть воздушных линий, имеющих протяженность около 25–50 км, из года в год получает разряды приблизительно в одни и те же участки, в то время как в остальную часть ВЛ молнии не попадают вообще. Одна из таких ЛЭП, расположенная в центральной части Мурманской обл., показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Ежегодная грозопоражаемость ЛЭП в центральной части Мурманской обл.  
**Fig. 2.** Annual lightning exposure of transmission lines in the central part of the Murmansk Oblast

Значение радиуса буферной зоны в примере составляет 2,3 км, за исключением выборки 2016–2022 гг., где радиус буферной зоны уменьшен до 1,2 км, чтобы поражаемые участки ЛЭП были более явные. В выборке отсутствуют 2020 и 2021 гг., так как в этот период разряды молний в ЛЭП не попадали.

Результаты регистрации молний в 2016 г. показали, что исследуемая ЛЭП получила пять ударов молний, в результате чего выявлены три участка, за которыми будем дальше вести наблюдение. Это первый участок с 10-й по 15-ю опоры, второй — с 32-й по 37-ю и третий — с 48-й по 53-ю опоры.

В грозовом сезоне 2017 г. в зону ВЛ попали два разряда, один из них оказался чуть в стороне от начала ВЛ и не внес сильных изменений в общий график интенсивности, а вот второй снова попал во второй участок с опорами с 32-й по 37-ю.

Грозовой сезон 2018 г. отметился для ВЛ всего одним разрядом, который попал в ранее упомянутый первый участок с опорами 10–20.

В 2019 г. в ЛЭП попали четыре разряда, три из которых попали в первый участок и чуть расширили его с 10-й по 25-ю опоры, а четвертый разряд попал во второй участок.

В 2020–2021 гг. в ЛЭП разряды не попали, а в 2022 г. было зарегистрировано три попадания, и опять — в наблюдаемые участки. Один разряд попал в третий участок в районе 45-й опоры, два других попали в первый участок.

Полная выборка разрядов с 2016 по 2022 гг. более явно показала три наиболее поражаемых участка ВЛ, в связи с чем имеет смысл взять их на контроль и провести исследования на предмет повреждений элементов ВЛ, которые, скорее всего, имеют место быть. Это участки с 12-й по 26-ю опоры, с 32-й по 37-ю и с 45-й по 58-ю опоры.

Такие «аномальные» участки на линии могут быть связаны с характером местности, качеством заземления опор и проводимостью грунта. Необходимо провести дополнительные исследования, чтобы выяснить причину такой избирательности молниевых разрядов.

## Заключение

Метод оценки уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи успешно применяется в веб-проекте по анализу аварийности ЛЭП вследствие ударов молний. Проводится анализ воздушных линий на выявление поражаемых участков, что может представлять интерес для предприятий, эксплуатирующих различные ВЛ. Данный метод может быть применен к любой воздушной линии, если имеется набор данных о координатах молниевых разрядов в районе прохождения воздушной линии.

## Список источников

1. Куликов А. Л., Ананьев В. В. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач // Вестник ИГЭУ. 2014. № 4. С. 21–25.
2. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А. Л. Куликов [и др.]. // Электрические станции. 2015. № 7. С. 45–53.
3. Куликов А. Л., Лукичева И. А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16–21.
4. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата / В. П. Дикой [и др.] // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 16–25. EDN: SIMDAN.
5. Ильина Е., Меркулов И. Опыт проведения ультрафиолетового контроля изоляции ВЛ в ПАО «МОЭСК» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № S1 (1). С. 38–41. EDN: YVKCHV.
6. Об утверждении правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 12.08.2022 № 811 // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (дата обращения: 02.05.2023).

7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for Calculating of Lightning Impact Level on Overhead Transmission Line // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11. P. 6609. <https://doi.org/10.3390/app11146609>.
8. Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз / В. Н. Морозов [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2009. № 560. С. 213–242.
9. Московенко В. М., Знаменщиков Б. П., Золотарев С. В. Применение системы грозопеленгации «Верей-МР» в интересах электроэнергетики России // *Новое в российской электроэнергетике.* 2012. № 2. С. 15–23.
10. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2002. Vol. 64, No. 7. P. 817–830.
11. National Lightning Detection Network NLDN. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (дата обращения: 02.05.2023).
12. Diendorfer G., Pedebay S., Poman, D. R. The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation / W. Schulz [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2016. Vol. 16. P. 595–605.
13. Boltek. Lightning Detection Systems. URL: <https://www.boltek.com/> (дата обращения: 02.05.2023).
14. Global Lightning Network — TOA Systems. URL: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (дата обращения: 02.05.2023).
15. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. URL: <https://www.blitzortung.org> (дата обращения: 02.05.2023).

## References

1. Kulikov A. L., Anan'ev V. V. Adaptivnoe volnovoe opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedach [Adaptive wave detection of transmission line faults]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2014, No. 4, pp. 21–25. (In Russ.).
2. Kulikov A. L., Lachugin V. F., Anan'ev V. V., Vukolov V. Yu., Platonov P. S. Modelirovanie volnovykh processov na liniyah elektroperedachi dlya povysheniya tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya [Modelling of wave processes on power lines to improve fault location accuracy]. *Elektricheskie stancii* [Electrical Power Stations], 2015, No. 7, pp. 45–53. (In Russ.).
3. Kulikov A. L., Lukicheva I. A. Opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi po mgnovennym znacheniyam oscillogramm avarijnyh sobytij [Determining the fault location of a transmission line from the instantaneous values of fault event waveforms]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2016, No. 5, pp. 16–21. (In Russ.).
4. Dikoj V. P., Levandovskij A. A., Arbuzov R. S., Ovsyannikov A. G., Starcev V. V. Monitoring sostoyaniya vozdushnyh linij elektroperedachi s ispol'zovaniem bescpilotnogo letatel'nogo apparata [Monitoring of overhead transmission lines using an unmanned aerial vehicle]. *Energiya edinoj seti* [Unified Grid Energy], 2014, No. 2 (13), pp. 16–25. (In Russ.). EDN: SIMDAN.
5. Il'ina E., Merkulov I. Opyt provedeniya ul'traioletovogo kontrolya izolyacii VL v PAO “MOESK” [Experience from MOESK in carrying out ultraviolet monitoring of overhead line insulation]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and distribution], 2016, No. S1 (1), pp. 38–41. (In Russ.). EDN: YVKCHB.
6. *Prikaz Ministerstvay energetiki Rossijskoj Federacii ot 12 avgusta 2022 g. № 811 “Ob utverzhenii pravil tehniceskoy ekspluatcii elektroustanovok potrebitelej elektricheskoy energii”* [About the approval of the rules of technical operation of electrical installations of consumers of electric energy]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (accessed 02.05.2023).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for Calculating of Lightning Impact Level on Overhead Transmission Line. *Appl. Sci.* 2021, Vol. 11., pp. 6609. <https://doi.org/10.3390/app11146609>.
8. Morozov B. N., Popov I. B., Snegurov A. V., Snegurov V. S., Sokolenke L. G., Shvarc Ya. M. Issledovaniya v oblasti atmosfernogo elektrichestva i pelengacii гроз [Studies in atmospheric electricity

- and direction finding of thunderstorms]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoj observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory], 2009, No. 560, pp. 213–242. (In Russ.).
9. Moskovenko V. M., Znamenshchikov B. P., Zolotarev S. V. Primenenie sistemy grozopelengacii “Vereya-MR” v interesah elektroenergetiki Rossii [Application of the Vereya-MR lightning guidance system in the interests of the Russian electricity sector]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* [New in the Russian electricity sector], 2012, No. 2, pp. 15–23. (In Russ.).
  10. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, Vol. 64, No. 7, pp. 817–830.
  11. National Lightning Detection Network NLDN. Available at: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (accessed 02.05.2023).
  12. Schulz W., Diendorfer G., Pedeboy S., Poelman D. R. The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2016, Vol. 16 pp. 595–605.
  13. Boltek. Lightning Detection Systems. Available at: <https://www.boltek.com/> (accessed 02.05.2023).
  14. Global Lightning Network — TOA Systems. Available at: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (accessed 02.05.2023).
  15. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <https://www.blitzortung.org> (accessed 02.05.2023).

#### ***Информация об авторе***

**А. В. Бурцев** — научный сотрудник.

#### ***Information about the author***

**A. V. Burtsev** — Researcher.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 551.594.221  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.009

## АНАЛИЗ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ В 2022 Г.

**Василий Николаевич Селиванов<sup>1</sup>, Антон Владимирович Бурцев<sup>2</sup>,  
Александр Николаевич Кизенков<sup>3</sup>, Александр Александрович Сулоев<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Производственное отделение «Северные электрические сети» Мурманского филиала  
«Россети Северо-Запад», Мурманск, Россия

<sup>4</sup>Производственное отделение «Центральные электрические сети» Мурманского филиала  
«Россети Северо-Запад», Апатиты, Россия

<sup>1</sup>v.selivanov@ksc.ru

<sup>2</sup>a.burtsev@ksc.ru

<sup>3</sup>kizenkov@ses.kolenergo.ru

<sup>4</sup>suloev@ces.kolenergo.ru

### Аннотация

Представлены результаты анализа молниевой активности в 2022 г. на территории Мурманской области по данным некоммерческой сети грозопеленгации Blitzortung. Приводятся данные о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе молниевых разрядов и их распределении по территории. Исследована статистика аварийных отключений воздушных линий электропередачи, вызванных ударами молний в электрические сети Кольской энергосистемы. Представлен пример анализа интенсивности грозовой деятельности по трассе воздушной линии.

### Ключевые слова:

молниевая активность, Мурманская обл., грозопеленгация, линии электропередачи

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Кизенков А. Н., Сулоев А. А. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2022 г. // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 73–83. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.009.

Original article

## ANALYSIS OF THE 2022 LIGHTNING ACTIVITY IN THE MURMANSK REGION

**Vasilii N. Selivanov<sup>1</sup>, Anton V. Burtsev<sup>2</sup>, Aleksandr N. Kizenkov<sup>3</sup>, Aleksandr A. Suloev<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>3</sup>Production Department "North Electric Networks" of the Murmansk branch of "Rosseti North-West",  
Murmansk, Russia

<sup>4</sup>Production Department "Central Electric Networks" of the Murmansk branch of "Rosseti North-West",  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>v.selivanov@ksc.ru

<sup>2</sup>a.burtsev@ksc.ru

<sup>3</sup>kizenkov@ses.kolenergo.ru

<sup>4</sup>suloev@ces.kolenergo.ru

### Abstract

The article analyses lightning activity in 2022 on the Murmansk region territory according to the data of the non-commercial lightning detection network — Blitzortung. Data on the duration of the thunderstorm season, the number of thunderstorm days, the number of lightning discharges and their distribution over the territory are given. The statistics of emergency failures of overhead power lines caused by lightning strikes in the power grids of the Kola power system are investigated. An example of an analysis of the intensity of lightning activity along the overhead line route is presented.

**Keywords:**

lightning activity, Murmansk region, lightning location, overhead transmission lines

**Acknowledgments:**

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

**For citation:**

Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kizenkov A. N., Suloev A. A. Analysis of the 2022 lightning activity in the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 73–83. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.009.

**Введение**

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН с 2013 г. ежегодно выпускает обзоры молниевой активности на территории Мурманской области [1–4] на основе данных общедоступной некоммерческой сети грозопеленгации Blitzortung [5]. В обзорах приводятся сведения о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе грозовых разрядов и их распределении на территории Мурманской области. Для анализа молниевой активности используется информационный ресурс собственной разработки «E-GRID Power Network DB – Электрические сети: База данных» (<http://egrid.iem.kolasc.net.ru>). База данных ресурса содержит информацию о воздушных линиях электропередачи (ВЛ) и подстанциях Кольской энергосистемы, а также координаты ударов молнии в землю на территории Мурманской области. Для обработки данных грозопеленгации создано собственное программное обеспечение, позволяющее анализировать молниевую активность в заданном регионе и вычислять уровень воздействия грозовых разрядов на конкретную ВЛ [6, 7].

**Анализ грозовой активности**

Грозовой сезон 2022 г. начался 16 мая, последняя гроза отмечена 28 августа. Данные о грозовой деятельности за последние 6 лет представлены в табл. 1. Стоит отметить, что 2021 и 2022 гг. демонстрируют относительно высокую молниевую активность, но грозовой сезон стал короче, чем в предыдущие годы, когда он заканчивался в сентябре. За шесть лет (с 2017 по 2022 гг.) зарегистрирован 231 день с грозой, из них свыше 50 с относительно высокой интенсивностью (более 100 разрядов в день).

В табл. 2 представлены данные о распределении разрядов по месяцам в течение грозовых сезонов. Максимум грозовой деятельности в 2022 г. был в июле, на который пришлось 74 % зарегистрированных разрядов. Хотя в целом максимальная грозовая активность отмечается в самый жаркий месяц года — июль, однако в 2018 г. максимум пришелся на август, в 2019 г. конец мая — начало июня были жаркими и дождливыми, с большим числом гроз, а в июле, напротив, гроз практически не было, 2022 г. в Мурманской обл. был очень теплым. По оценке ФГБУ «Мурманское УГМС» [8], средняя годовая температура воздуха превысила климатическую норму на 1,4 °С. Более высокие значения средней годовой температуры воздуха в области отмечались только в 1938 и 2020 гг. Сумма осадков, выпавших за лето 2022 г. в среднем по области, превысила климатическую норму почти на треть.

*Таблица 1*

Показатели грозовой активности на территории Мурманской области  
Lightning activity in Murmansk region

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Первая гроза	10 июня	14 мая	11 мая	02 июня	18 мая	16 мая
Последняя гроза	24 сентября	22 сентября	13 сентября	11 сентября	31 августа	28 августа
Грозовых дней	38	32	28	38	47	48
Всего разрядов	2555	7476	4287	1440	2944	8005

Результаты регистрации ударов молнии в землю на территории Мурманской области в грозовой сезон 2022 г. отображены на рис. 1. Наибольшая плотность разрядов наблюдается на юго-западе области — на границе с Республикой Карелия. Плотность закономерно снижается продвижением

на север и к морскому побережью на востоке. На карте показаны линии электропередачи и построенная в 2022 г. Кольская ветроэлектростанция. Как показал анализ молниевой активности за последние 10 лет, Кольская ВЭС расположена в очень благоприятном районе с низкой молниевой активностью. Грозовой сезон 2023 г. должен показать, насколько изменится грозовая деятельность в этом районе после возведения 57 объектов высотой до 140 м на площади 257 га.

Таблица 2

Распределение разрядов по месяцам года  
 Distribution of discharges by months of the year

Годы	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2017	0/0	5/83	19/1834	11/452	3/186
2018	5/312	6/805	11/2922	8/3430	2/7
2019	3/317	10/3127	5/27	6/799	4/17
2020	0/0	8/488	16/623	12/326	2/3
2021	4/290	13/634	16/1351	14/669	0/0
2022	1/1	10/1212	24/5889	13/903	0/0

Примечание. В числителе — число грозных дней, в знаменателе — количество разрядов в месяце.  
 Note. Thunderstorm days / discharges per month.

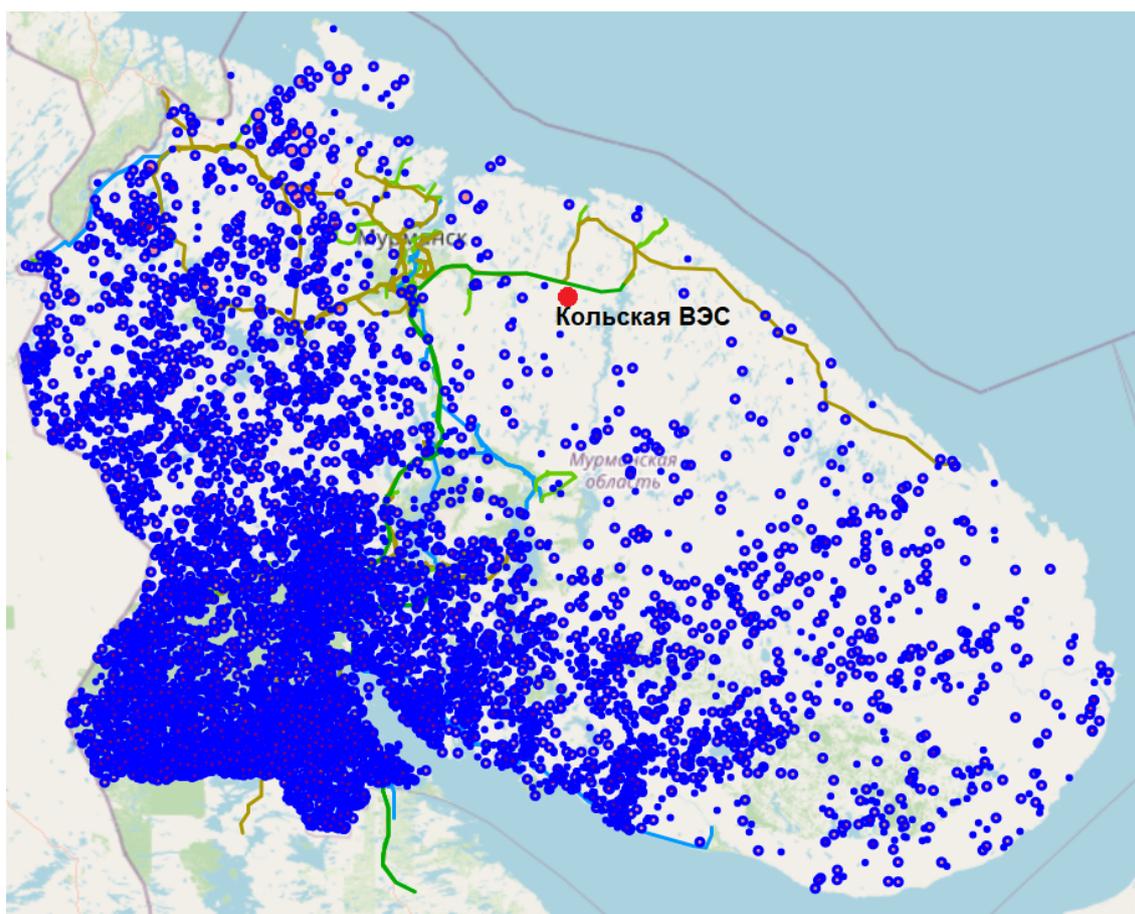
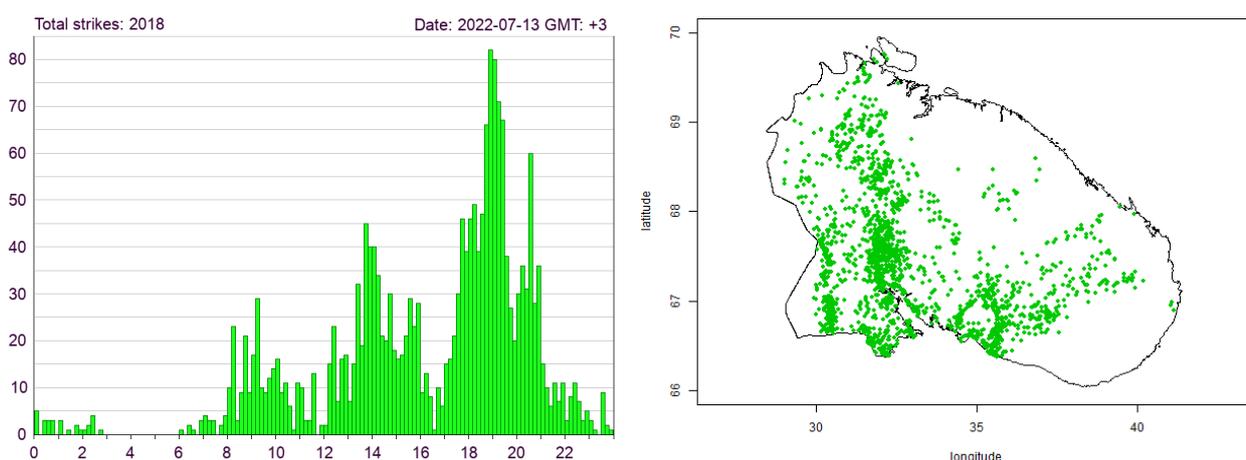


Рис. 1. Молниевые разряды в Мурманской обл. в 2022 г.  
 Fig. 1. Lightning discharges in the Murmansk region in 2022



**Рис. 2.** Распределение разрядов 13 июля 2022 г.  
**Fig. 2.** Discharge distributions July 13, 2022

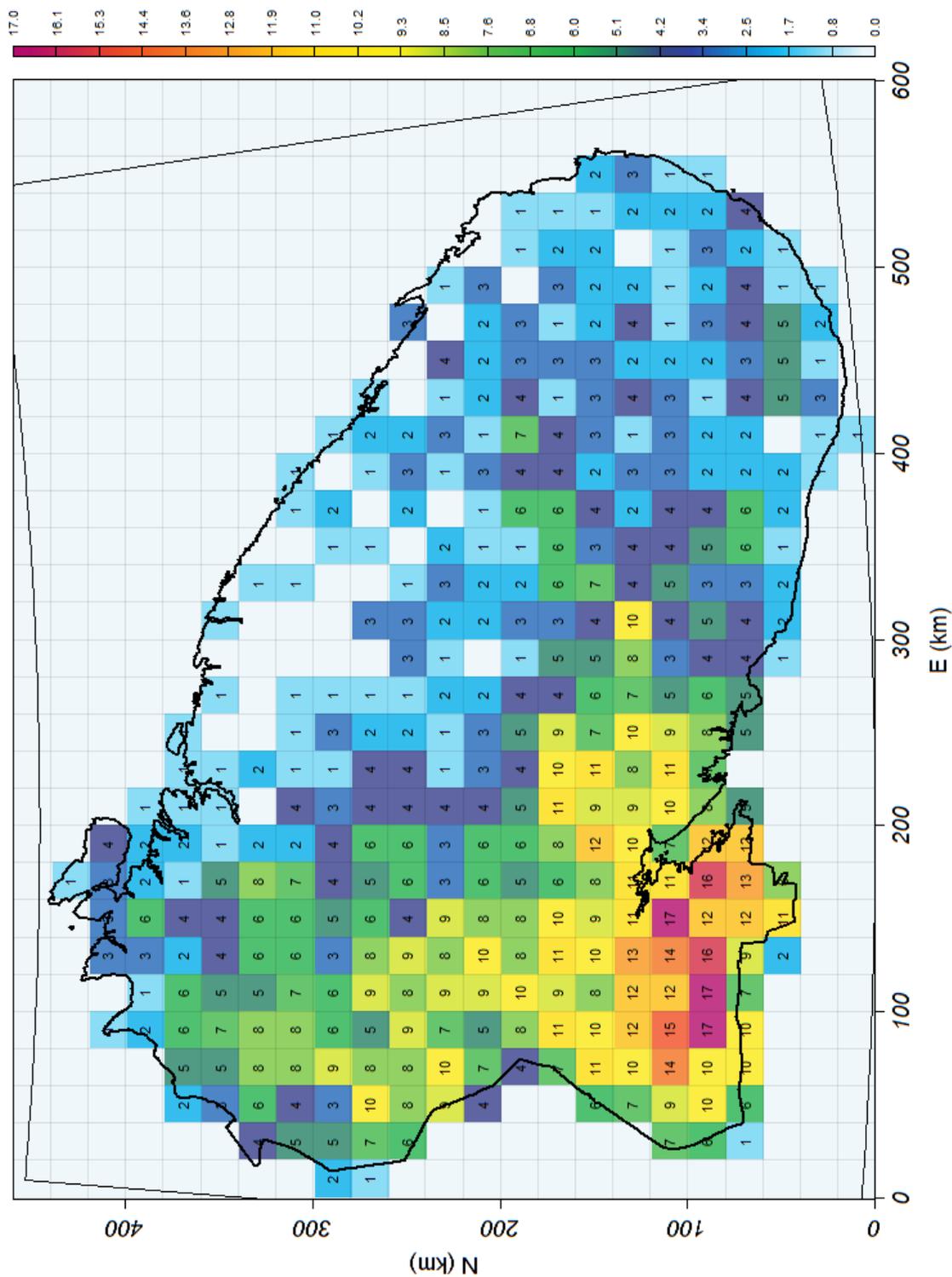
Четверть всех грозовых разрядов пришлось на один день — 13 июля 2022 г., когда было зарегистрировано 2018 ударов молний в землю. На рис. 2 показан график распределения разрядов во времени и карта распределения по территории Мурманской области в течение этого дня. Приведем данные по двум важнейшим показателям молниевой активности — число дней с грозой и плотность разрядов молнии в землю.

По определению термина, день с грозой — это сутки, когда на метеостанции наблюдалась гроза. С внедрением инструментальных средств грозопеленгации стало возможным учитывать все молниевые разряды на обширной территории. В данной статье день с грозой — это сутки, когда на территории Мурманской области был зарегистрирован хотя бы один удар молнии в землю, например, в мае 2022 г. был отмечен единственный разряд, поэтому 16 мая 2022 г. стал днем начала грозового сезона, хотя следующая гроза произошла только 3 июня 2022 г.

Результаты расчета распределения числа грозовых дней на территории Мурманской обл. за 2022 г. представлены на рис. 3. За день с грозой принимается любой день с одним или более разрядами молнии в землю. Расчеты выполнены для ячеек земной поверхности  $20 \times 20$  км, что приблизительно соответствует области наблюдения за грозовой деятельностью с помощью визуально-слухового метода на гидрометеорологических станциях и постах. На рис. 4 показаны результаты расчета плотности грозовых разрядов — число разрядов в  $1 \text{ км}^2$  земной поверхности. Эта величина также показана для квадратных областей размером  $20 \times 20$  км, поэтому для получения плотности число в ячейке необходимо разделить на 400. В отличие от предыдущей характеристики, значение плотности разрядов напрямую зависит от эффективности системы грозопеленгации. Сам факт наличия грозовых разрядов фиксируется достаточно надежно, что позволяет идентифицировать данный день как день с грозой. В то же время число зарегистрированных грозовых разрядов зависит от общей чувствительности грозопеленгационной сети, определяемой количеством датчиков, запеленговавших конкретный разряд на данной территории, а также настройками программного обеспечения сети. Таким образом, следует ожидать, что представленные на рис. 4 значения удельной плотности грозовых разрядов в несколько раз преуменьшены, но общая картина распределения плотности вряд ли сильно отличается от реальной.

### Анализ аварийности по причине гроз

Как видно из анализа, грозовая активность на Кольском полуострове характеризуется крайне низкими показателями. Несмотря на то, что в 2022 г. разрядов молний в землю и грозовых дней зарегистрировано больше, чем в грозовые сезоны предыдущих пяти лет, максимальная плотность разрядов едва превысила 0,5 единицы на  $1 \text{ км}^2$  территории в год. В России максимальная грозовая активность наблюдается в районе Черноморского побережья Кавказа и составляет примерно 7–8 единиц.



**Рис. 3.** Суммарное количество грозовых дней в ячейке 20×20 км<sup>2</sup> в 2022 г.  
**Fig. 3.** Total number of thunderstorm days in a 20×20 square km cell in 2022.

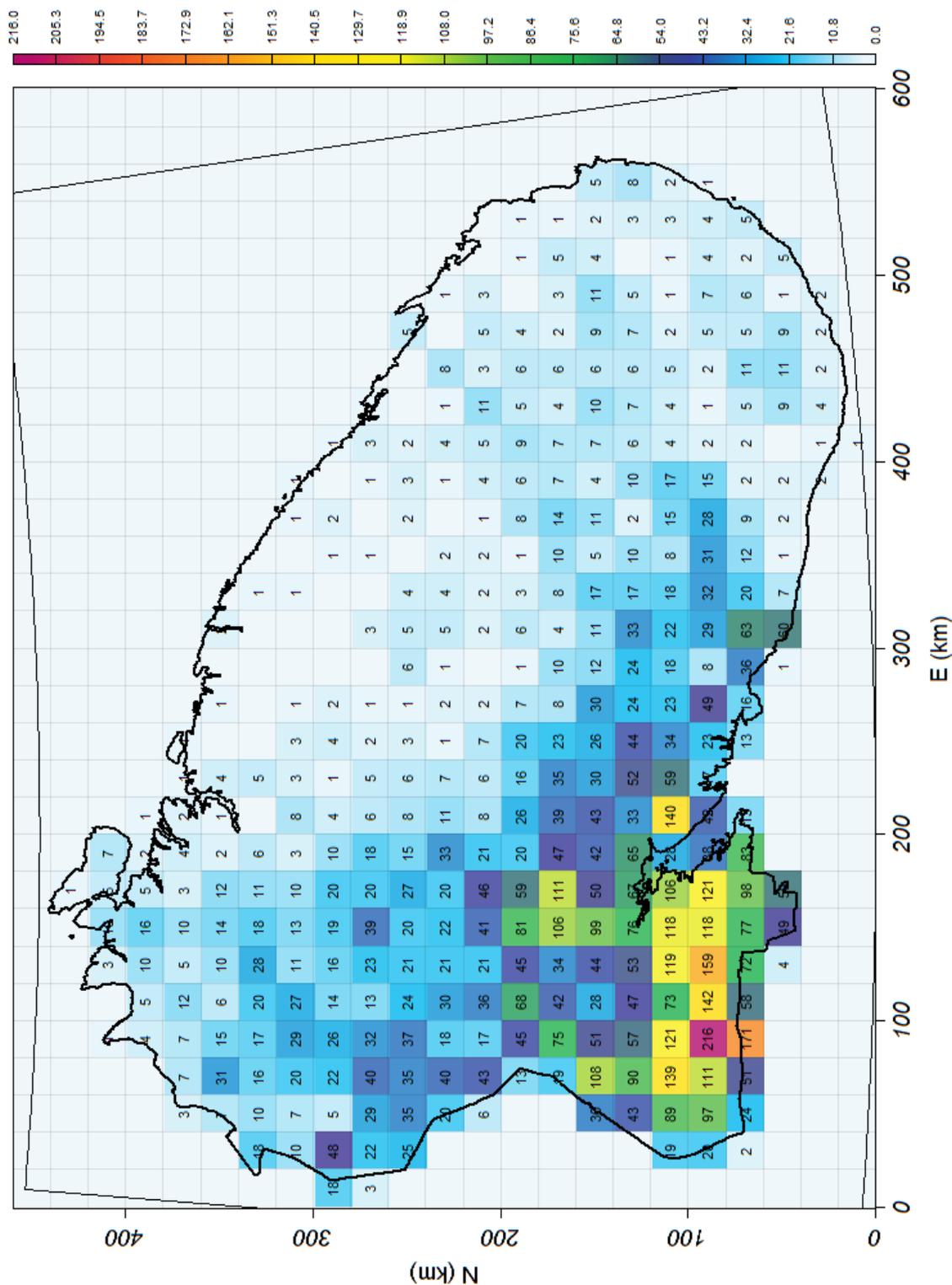


Рис. 4. Суммарное количество грозových разрядов в землю в ячейке 20×20 км<sup>2</sup> в 2022 г.  
 Fig. 4. The total number of lightning discharges into the ground in a 20×20 square kilometer cell in 2022.

Тем не менее, несмотря на тот факт, что грозовая активность на Кольском полуострове низкая, доля отключений линий электропередачи по причине атмосферных перенапряжений выше, чем в регионах с высокой грозовой активностью, и достигает 30 % от общего числа отключений. Причиной этого является высокое удельное сопротивление грунта. С одной стороны, это ограничивает значение тока молнии, но с другой — препятствует отводу энергии разряда в землю, что приводит к перекрытию линейной изоляции.

По информации, полученной от служб линий энергетических предприятий Мурманской области, в 2022 г. «грозовые» отключения воздушных линий электропередачи произошли 158 раз, это в три раза больше, чем в 2020 г., что подтверждает статистику по молниевой активности, полученную от сети Blitzortung. В табл. 3 представлены сравнительные данные по молниевой активности и числу отключений за период с 2013 по 2022 гг., а на рис. 5 эти же данные проиллюстрированы графиком, который демонстрирует явный периодический характер молниевой активности. Для подтверждения этого тренда и выявления параметров периодичности молниевой активности требуются более длинные ряды наблюдений.

Таблица 3

Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской области в 2013–2022 гг.  
 Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2013–2022.

Источник	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Число разрядов по Blitzortung	1057	2006	416	8036	2555	7476	4287	1440	2944	8005
Суммарное число отключений ВЛ	50	133	9	108	26	120	76	23	50	158

В 2022 г. зафиксировано 656 событий, в результате которых в зону действия грозового разряда попали объекты классов напряжений 35–330 кВ, из них в 60 событиях в зону действия попали подстанции. В 46 случаях центр зоны действия удара молнии в землю находился на расстоянии менее 100 м от подстанции или опоры линии электропередачи.



Рис. 5. Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской обл. в 2013–2022 гг.  
 Fig. 5. Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2013–2022

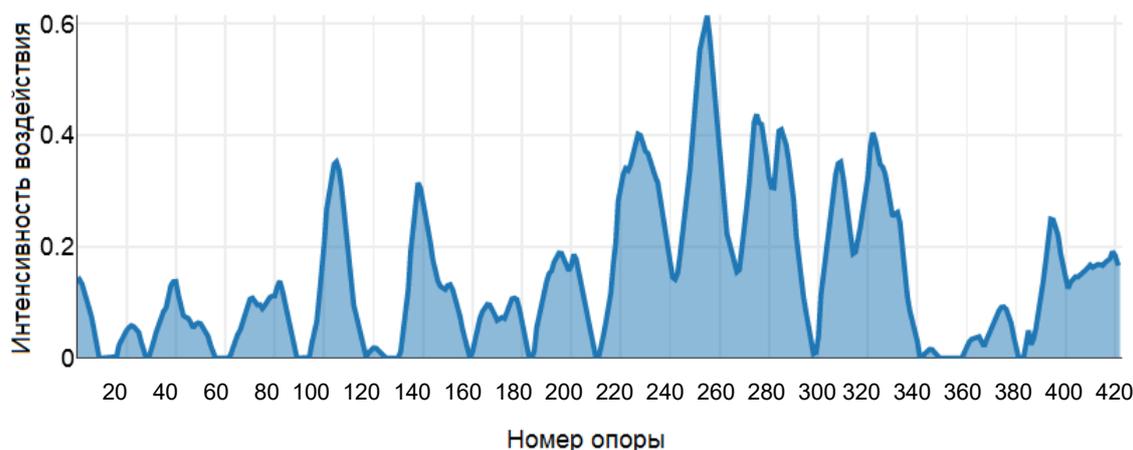
В 2023 г. планируется выполнение работ по организации молниезащиты одной из ВЛ Кольской энергосистемы. Одним из направлений использования сетей грозопеленгации является оптимизация

молниезащитных мероприятий путем анализа и выявления наиболее грозопоражаемых участков воздушных линий. Наибольшее влияние на распределение разрядов по трассе ВЛ имеют орографические факторы и удельная проводимость грунта в месте расположения опор. Разработанное нами программное обеспечение позволяет строить продольный профиль высот по трассе ВЛ [9]. На рис. 6 показан пример такого профиля для вышеупомянутой линии электропередачи класса напряжения 150 кВ, протяженностью 117,5 км и количеством опор 423 шт.

Для расчета грозопоражаемости ВЛ использован алгоритм оценки интенсивности воздействия молнии на опоры ЛЭП, который описан в работе [7]. Так как координаты грозовых разрядов вычисляются с погрешностью до 4 км, то вокруг ВЛ устанавливается заданный коридор — буферная зона и подсчитываются разряды, попавшие в эту зону. Под интенсивностью воздействия молнии на опору принимается значение, равное единице при прямом попадании в опору и уменьшающееся до нуля по мере приближения молнии к границе буферной зоны ВЛ. Для заранее заданного радиуса буферной зоны вычисляется интенсивность воздействия. На рис. 7 показано распределение интенсивности воздействия разрядов молний для заданного радиуса буферной зоны ВЛ за пятилетний период наблюдений. Как видно из сравнения рис. 6 и 7, профиль интенсивности грозовых воздействий на ВЛ в общих чертах повторяет ее продольный профиль высот.



**Рис. 6.** Продольный профиль ВЛ  
**Fig. 6.** Longitudinal profile of the overhead line



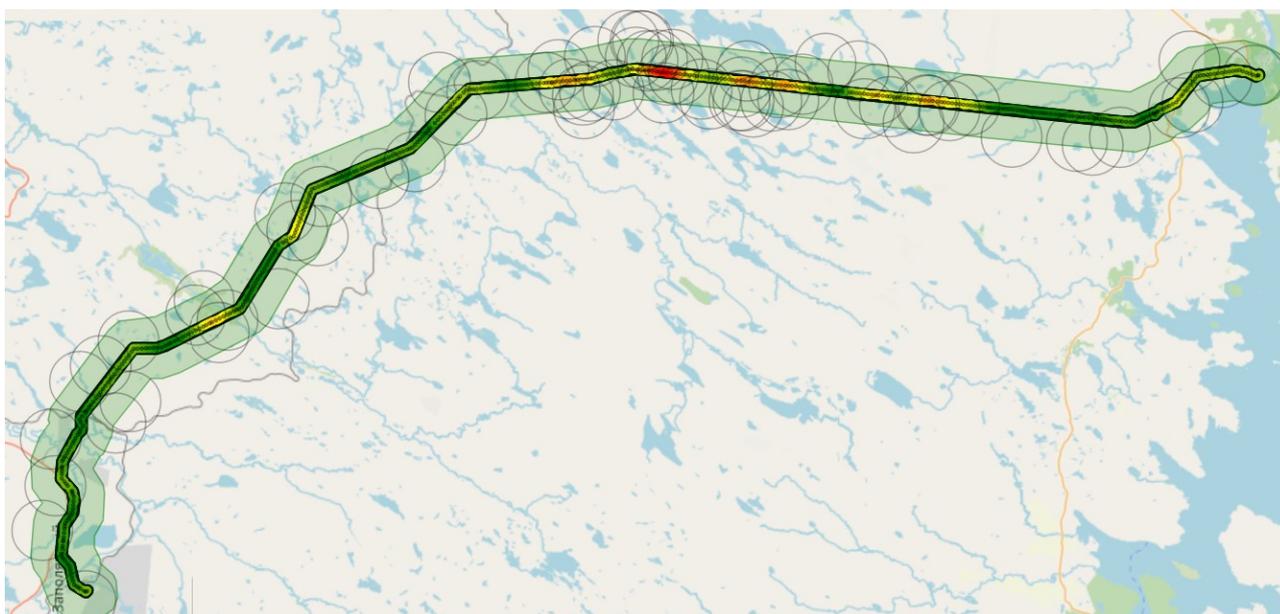
**Рис. 7.** Грозопоражаемость ВЛ за период с 2018 по 2022 гг.  
**Fig. 7.** The lightning performance of overhead lines for the period from 2018 to 2022

На рис. 8 показан маршрутный план воздушной линии, где наглядно цветом выделены участки, в которые наиболее часто попадают в зону действия молний и соответствующие пикам на рис. 7. Контур вокруг ВЛ — буферная зона линии, окружности — разряды молний, попавшие в заданную буферную зону ВЛ.

Анализ интенсивности молниевой деятельности за продолжительный период времени по трассе ВЛ позволяет выявлять наиболее поражаемые участки и именно на них проводить следующие молниезащитные мероприятия:

- снижение сопротивления заземляющих устройств опор;
- установка защитных аппаратов;
- организация тросовой защиты, координация линейной изоляции двухцепных линий электропередачи.

Такая «точечная» защита ВЛ позволяет сэкономить значительные средства и сократить время выполнения работ в условиях короткого ремонтного периода, что особенно актуально в районах Крайнего Севера.



**Рис. 8.** Карта интенсивности молний по трассе ВЛ за период с 2018 по 2022 гг.

**Fig. 8.** Map of lightning intensity along the overhead line for the period from 2018 to 2022

### Заключение

Развитие инструментальных систем грозопеленгации и вычислительной техники, применение современных методов анализа грозопоражаемости сосредоточенных и протяженных объектов предоставляют возможность для внедрения новых методик анализа аварийности в электрических сетях. Выявление наиболее уязвимых для молний участков воздушных линий в реальном масштабе времени позволяет оперативно находить и устранять повреждения, вызванные разрядами молний, а также оптимизировать молниезащитные мероприятия.

### Список источников

1. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М. Анализ результатов регистраций грозовой активности на Кольском полуострове в 2013–2014 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 6, № 6 (32). С. 34–40.
2. Анализ результатов регистрации грозовой активности на Кольском полуострове за 2014–2016 годы / А. В. Бурцев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8, № 8–15. С. 50–56.
3. Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Колобов В. В. Анализ молниевой активности на Кольском полуострове в 2019–2020 гг. // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 40–52.

4. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году / В. Н. Селиванов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 59–67.
5. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. 2016. URL: <http://www.blitzortung.org/> (дата обращения: 02.05.2023).
6. Бурцев А. В. Практическое применение метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 66–72.
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for calculating of lightning impact level on overhead transmission line // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, No. 14.
8. ФГБУ «Мурманское УГМС»: офиц. сайт. URL: <http://kolgimet.ru> (дата обращения: 02.05.2023).
9. Программа расчета промежуточных географических координат и построения продольного профиля протяженного объекта с заданным шагом: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619255 / Бурцев А. В., Селиванов В. Н.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. №2020618400; заявл. 27.07.2020; опубл. 13.08.2020. Бюл. № 8. 1 с.

## References

1. Burcev A. V., Nevretdinov Yu. M. Analiz rezul'tatov registracij grozovoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2013–2014 gg. [Analysis of lightning activity registration results on the Kola Peninsula in 2013–2014]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of Kola Scientific Centre RAS], 2015, Vol. 6, No. 6 (32), pp. 34–40 (In Russ.).
2. Burcev A. V., Yaroshevich V. V., Fastij G. P., Karpov A. S. Analiz rezul'tatov registracii grozovoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove za 2014–2016 gody [Analysis of lightning activity registration results in the Kola Peninsula in 2014–2016]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of Kola Scientific Centre RAS], 2017, Vol. 8, No. 8–15, pp. 50–56 (In Russ.).
3. Selivanov V. N., Burcev A. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoj aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2019–2020 gg. [Analysis of lightning activity on the Kola Peninsula in 2019–2020]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of Kola Scientific Centre RAS], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 40–52 (In Russ.).
4. Selivanov V. N., Burcev A. V., Ivonin V. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoj aktivnosti v Murmanskoj oblasti v 2021 godu [Analysis of Lightning Activity in the Murmansk Oblast in 2021]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of Kola Scientific Centre RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3. pp. 59–67 (In Russ.).
5. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <http://www.blitzortung.org> (accessed 02.05.2023).
6. Burcev A. V. Prakticheskoe primenenie metoda rascheta urovnya vozdejstviya molnii na vozdushnye linii elektropredachi [Practical Application of the Method for Calculation of Lightning Impact Level on Overhead Power Lines]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2023, Vol. 14, No. 6, pp. 66–72 (In Russ.).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for calculating of lightning impact level on overhead transmission line. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, No. 14.
8. FGBU Murmanskoe UGMS [Federal State Budgetary Institution “Murmansk Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring”]. Available at: <http://kolgimet.ru/> (accessed 02.05.2023). (In Russ.).
9. Burcev A. V., Selivanov V. N. *Programma rascheta promezhutochnyh geograficheskikh koordinat i postroeniya prodol'nogo profilya protyazhennogo ob'ekta s zadannym shagom. Svidetel'stvo*

*o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM No. 2020619255* [Program for Estimation of Intermediate Geographical Coordinates and Construction of Longitudinal Profile of an Extended Object with a Set Step. Certificate of state registration of computer program No. 2020619255], No. 2020618400, zayavl. 27.07.2020; opubl. 13.08.2020, Byul. No. 8, 1 p. (In Russ.).

***Информация об авторах***

**В. Н. Селиванов** — кандидат технических наук, директор;  
**А. В. Бурцев** — научный сотрудник;  
**А. Н. Кизенков** — начальник службы воздушных линий электропередачи;  
**А. А. Сулоев** — начальник службы воздушных линий электропередачи.

***Information about the authors***

**V. N. Selivanov** — PhD (Engineering), Director;  
**A. V. Burtsev** — Researcher;  
**A. N. Kizenkov** — Chief of Overhead Power Line Service;  
**A. A. Suloev** — Chief of Overhead Power Line Service.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

Научная статья  
УДК 622.236.73  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010

## К ВОПРОСУ ОБ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ НА РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

**Андрей Александрович Климов<sup>1</sup>, Василий Николаевич Селиванов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>a.klimov@ksc.ru

<sup>2</sup>v.selivanov@ksc.ru

### Аннотация

Рассматриваются зависимости удельных затрат энергии на разрушение различных материалов естественного и искусственного происхождения от крупности конечного продукта. Также в общем виде представлено аналитическое выражение для описания характеристик энергозатрат, аналогичное моделям, применяемым при оценке разрушаемости горных пород механическими методами.

### Ключевые слова:

электроимпульсный и электрогидроимпульсный методы, энергозатраты, дезинтеграция, руды, шлаки, карбид кремния

### Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

### Для цитирования:

Климов А. А., Селиванов В. Н. К вопросу об удельных энергозатратах на разрушение материалов естественного и искусственного происхождения электрофизическими методами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 84–92. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

Original article

## TO THE QUESTION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION FOR THE FRACTURE OF MATERIALS OF NATURAL AND ARTIFICIAL ORIGIN BY ELECTROPHYSICAL METHODS

**Andrey A. Klimov<sup>1</sup>, Vasilii N. Selivanov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

<sup>1</sup>a.klimov@ksc.ru

<sup>2</sup>v.selivanov@ksc.ru

### Abstract

The article considers the dependences of specific energy consumption for fracture of various materials of natural and artificial origin on the coarseness of the final product. It also presents, in general terms, an analytical expression to describe the characteristics of energy consumption, similar to the models used in assessing the fractability of rocks by mechanical methods.

### Keywords:

electrodynamical method, electrohydraulic method, energy consumption, disintegration, ores, slag, silicon carbide

### Acknowledgements:

This work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

### For citation:

Klimov A. A., Selivanov V. N. To the question of specific energy consumption for the fracture of materials of natural and artificial origin by electrophysical methods // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 84–92. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

### Введение

В последние десятилетия развитие электрофизических технологий позволило создать и апробировать в различных промышленных процессах новые методы обработки, рециклинга

и разрушения материалов. Проводятся обширные исследования по увеличению эффективности дробления и измельчения горных пород и руд, обогащения хвостов добычи ископаемых и доизвлечения полезных компонентов из шлаков металлургических производств, работы по улучшению качества и степени разделения компонентов техногенного сырья при его переработке.

Электрофизические (электроразрядные) методы разрушения по характеру воздействия принято разделять на электроимпульсный и электрогидроимпульсный — в зависимости от того, разрушается ли материал непосредственно электрическим разрядом и отражёнными волнами или же опосредованно с помощью ударных волн давления от пробоя среды, в которую помещён материал. В качестве альтернативы механическим методам дробления, электрофизические методы могут предложить следующие преимущества: независимость эффективности разрушения от показателей твёрдости материала; разделение различных по диэлектрической проницаемости фаз, входящих в структуру материалов; выделение из структуры разрушаемого вещества проводящих включений; малый износ измельчающего инструмента; возможность регулирования гранулометрического состава продукта за счёт изменения амплитуды воздействующего напряжения. Однако у данных технологий присутствуют и недостатки: изменение химического состава поверхности продуктов дробления при воздействии на материалы с низкой температурой плавления; необходимость в жидкой среде с низкой проводимостью для осуществления импульсного пробоя материала; снижение эффективности воздействия при уменьшении характерных размеров образцов для разрушения; низкая или практически нулевая эффективность фрагментации минералов и руд с малым удельным сопротивлением.

Основные цели исследований электроразрядного разрушения горных пород и руд последних лет — это определение факторов, влияющих на гранулометрический состав получаемого продукта и эффективность выделения отдельных компонентов [1, 2]. Также проводятся эксперименты по осуществлению предварительного электроимпульсного разупрочнения рудных пород для снижения затрат энергии на последующей стадии механического дробления [3]. В отношении электроимпульсного воздействия на металлосодержащие шлаки и техногенное сырьё главной задачей выступает достижение наибольшей избирательности разрушения и степени разделения составляющих фаз [4].

Поскольку исследователи в большей степени ориентируются только на преимущества электроразрядного разрушения по сравнению с механическим дроблением, то достаточно малая часть научных работ в этой области освещает удельные энергозатраты на процесс фрагментации различных материалов. По этой причине в Центре энергетики Севера КНЦ РАН были проведены исследования по электроимпульсному и электрогидроимпульсному разрушению различных искусственных материалов и горных пород, направленные на рассмотрение зависимостей удельных энергозатрат стадийного разрушения материалов и определения возможности описания этих зависимостей с помощью аналитических выражений, схожих с моделями «размер-энергия», применяемыми при механическом дроблении.

### Исследуемые материалы

Для экспериментов по определению удельных энергозатрат на электроимпульсное и электрогидроимпульсное разрушение использовались образцы следующих материалов:

- апатит-нефелиновая руда АО «Апатит»;
- железная руда комбината «ОЛКОН»;
- шлак медно-никелевого производства комбината «Североникель»;
- сrostки необработанного карбида кремния (SiC) собственного производства Волжского абразивного завода.

Руды, добываемые АО «Апатит» (рис. 1, а), представляют собой многокомпонентный материал, основную часть которого составляют минералы — фторапатит и нефелин [5]. В проведённых ранее исследованиях было установлено, что использование электроимпульсного измельчения (по сравнению с механическими методами разрушения) позволяет повысить процент высвобождения некоторых

ценных компонентов [6]. Сравнительное дробление совместно с несколькими другими минералами Кольского полуострова показало, что апатит-нефелиновая руда имеет наименьшую величину удельных энергозатрат разрушения при дроблении образцов размером порядка 150 мм до фракции менее 15 мм (табл. 1) [7].



**Рис. 1.** Образцы горных пород и шлака, подвергнутые электроимпульсному воздействию:  
*a* — апатит-нефелиновая руда; *б* — железная руда; *в* — шлак медно-никелевого производства  
**Fig. 1.** Samples of rocks and slag subjected to electric pulse treatment:  
*a* — apatite-nepheline ore; *б* — iron ore; *в* — slag of copper-nickel production

Таблица 1

Удельные затраты энергии на электроимпульсную дезинтеграцию  
 некоторых горных пород Кольского полуострова до размера менее 15 мм, кВт·ч/т  
 Specific energy consumption for electric pulse disintegration  
 of some rocks of the Kola Peninsula to a size of less than 15 mm, kWh/t

Фенит штаффелизированный	Перидотит	Диабаз	Железная руда (ОЛКОН)	Апатит-нефелиновая руда
19,1	24,6	24,6	20,6	12,9

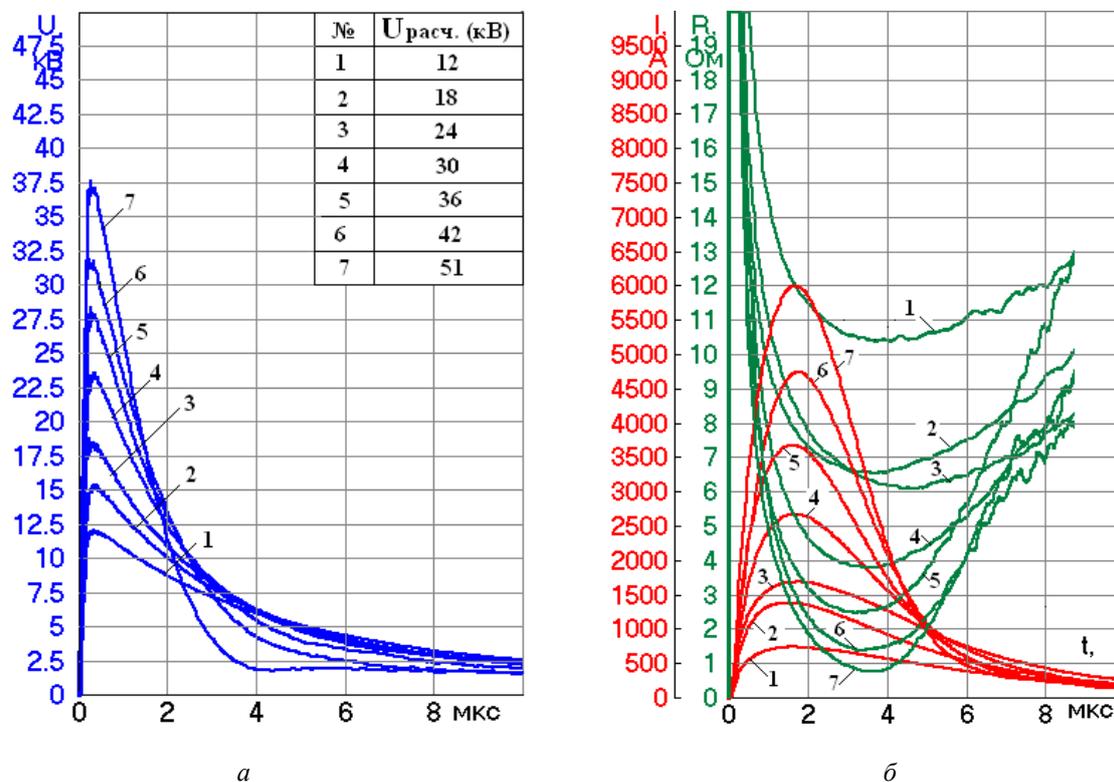
Железные руды комбината «ОЛКОН» Оленегорского рудного месторождения (рис. 1, *б*) образованы железистыми кварцитами, основу которых составляет минерал магнетит. Содержание железа в этих рудах может достигать до 30 % [8], что обуславливает их высокую проводимость и низкую подверженность электроимпульсному разрушению.

Шлаки цветной металлургии комбината «Североникель» (рис. 1, *в*) в основной своей массе состоят из матрицы, образованной алюмосиликатом кальция с примесями окислов железа и проводящих включений цветных металлов [9]. Электроимпульсное разрушение в таких композиционных материалах происходит по расположению проводящих включений, однако их большое содержание может препятствовать развитию канала разряда и снижать производительность разрушения, особенно при уменьшении размера измельчаемого материала. Промышленный процесс получения карбида кремния заключается во взаимодействии кремнезёма с углеродом при нагреве до температур 1600–2500 °С в электропечи Ачесона особой конструкции. В необработанном виде после разбивания спечённая масса представляет собой пористый с одной стороны и поликристаллический пластинчатый чёрный твёрдый материал с другой. На рис. 2 показаны куски образовавшихся при остывании расплава кристаллов. В составе этих кристаллов содержится до 93 % карбида кремния, а также в нижней части кусков находится графит, не прореагировавший с шихтой в процессе изготовления.



**Рис. 2.** Образцы необработанной друзы карбида кремния после процесса спекания  
**Fig. 2.** Samples of untreated drusen of silicon carbide after the smelting process

Предварительные эксперименты по воздействию высоковольтных импульсов на сродки карбида кремния показали, что материал проявляет сильные полупроводниковые свойства, то есть даже при кратковременном воздействии на него высокого напряжения его сопротивление практически мгновенно уменьшается до уровня единиц ома и формирования канала пробоя не происходит. На рис. 3 приведены совмещенные осциллограммы напряжения (3, *a*) разряда ёмкости 0,4 мкФ на электродную систему «остриё-остриё» с образцом SiC, а также импульсные токи и расчётные зависимости импульсного сопротивления образца (3, *b*). Исходя из определённых выше свойств, в данной работе для разрушения карбида кремния применялся электрогидроимпульсный метод.

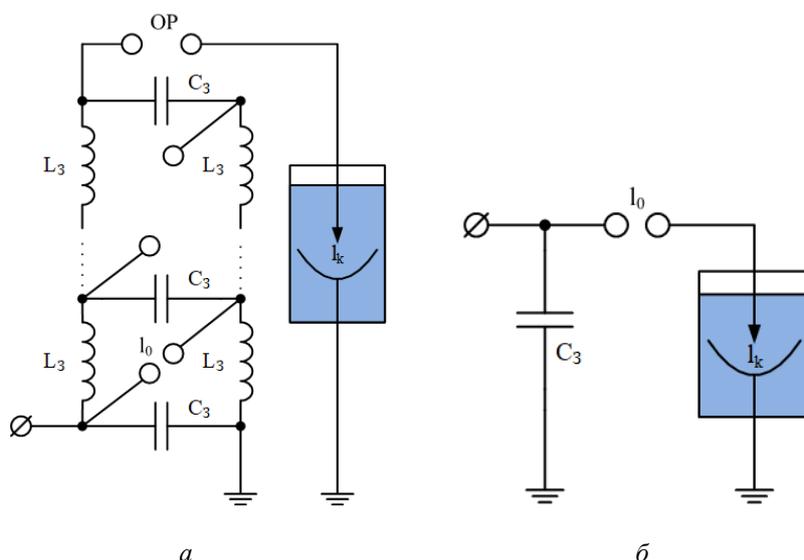


**Рис. 3.** Параметры тестовых импульсных разрядов на образец SiC:  
*a* — осциллограммы импульсов напряжения на электродной системе с образцом; *b* — осциллограммы импульсного тока через образец и расчётные кривые сопротивления  
**Fig. 3.** Parameters of test pulse discharges on the SiC sample:  
*a* — oscillograms of voltage pulses on the electrode system with the sample; *b* — oscillograms of pulse current through the sample and calculated resistance curves

### Устройства дезинтеграции

В процессе определения удельных энергозатрат разрушения материалов использовались следующие установки:

- семиступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) с запасаемой в накопителях энергией до 1,4 кДж, создававший импульсы с длительностью фронта порядка 150 нс и амплитудой напряжения до 320 кВ (рис. 4, а);
- генератор импульсных токов (ГИТ), составленный из трёх параллельно подключенных конденсаторов общей ёмкостью 2 мкФ (рис. 4, б).



**Рис. 4.** Схемы экспериментальных установок:

а — генератор импульсных напряжений (ГИН); б — генератор импульсных токов (ГИТ);  $I_0$  — задающий разрядник; OP — отделительный разрядник ГИН;  $C_3$  — зарядная ёмкость;  $L_3$  — зарядная индуктивность

**Fig. 4.** Schematics of experimental setups:

а — pulse voltage generator (PVG); б — pulse current generator (PCG);  $I_0$  — initiating spark gap; OP — separating spark gap of PVG;  $C_3$  — charging capacitance;  $L_3$  — charging inductance

Первый генератор применялся для электроимпульсного дробления горных пород и шлака, второй — для электрогидравлического разрушения сростков и кристаллов карбида кремния. Рабочей ёмкостью для разрушения являлась дробильно-измельчительная камера, которая состояла из следующих компонентов: полиэтиленовой изоляционной стенки с закреплённой внутри электродной системой «потенциальное остриё — заземлённое сито» и металлического бака под ситом для сбора раздробленного продукта. Конструкция камеры представлена в работе [6]. В стадийном разрушении использовались стальные сита чашеобразной формы с круглыми отверстиями диаметром 15, 5, 3, 2 и 1 мм для вывода материала из зоны разрушения. Размер ячеек сит определяет максимальную крупность продукта на данной стадии. В случае электроимпульсного воздействия объёмы навесок образцов для фрагментации выбирались таким образом, чтобы рабочий промежуток всегда оставался заполненным; тем самым предотвращалось изменение характера воздействия на электрогидроимпульсное.

Дробление горных пород проводилось при максимальных параметрах ГИН — 315 кВ и 1400 Дж в импульсе; воздействие на медно-никелевый шлак осуществлялось в режиме ГИН с напряжением 224 кВ и энергией в импульсе порядка 720 Дж. Электрогидравлическое воздействие на фрагменты друзы карбида кремния проходило при напряжении пробоя задающего промежутка 45 кВ и уровне запасённой энергии 2000 Дж.

### Результаты исследований

В технологических циклах механического дробления горных пород для оценки энергии, которую необходимо затратить на доведение подаваемого в щековую и валковую дробилку материала

от исходного размера до размера продукта используются различные модели соотношения «размер-энергия», обобщённые Хукки [10]:

$$e = W \left( \frac{1}{r_p^{f(r_p)}} - \frac{1}{r_f^{f(r_f)}} \right), \quad (1)$$

где  $e$  — удельные энергозатраты, кВт·ч/т;  $W$  — индекс измельчаемости (work index), кВт·ч/т;  $f, p$  — сокращения от подаваемого в дробилку материала (питание, feed) и измельчённого (продукт, product);  $r_f$  и  $r_p$  — характерный размер частиц исходного материала и конечного продукта соответственно, мм;  $f(r)$  — экспонента Хукки, функция характеристического размера.

Аналогичные выражения можно использовать и для описания энергозатрат на дробление при электрофизических методах воздействия с учётом особенностей разрушающего инструмента — системы электродов. В табл. 2 представлены данные удельных энергий разрушения исследованных материалов в стадийном процессе, при котором раздробленный продукт с предыдущей стадии разделяется на фракции, минимальная фракция отделяется, а остальные идут на соответствующие следующие стадии.

Таблица 2

Удельные энергозатраты на электроимпульсное дробление  
 исследованных материалов на различных стадиях, кВт·ч/т  
 Specific energy consumption for electric pulse crushing of the studied materials at different stages, kWh/t

Материал	Стадии дробления (размер ячеек сита)			
	I (15 мм)	II (5 мм)	III (2 мм)	IV (1 мм)
Апатит-нефелиновая руда	12,9	22,4	39,8	–
Железная руда	20,6	37,2	89,4	–
Медно-никелевый шлак	14,2	22,3	58,2	169,9
Карбид кремния	8,4	49,4	106,2*	–

\* Размер ячеек сита 3 мм.

Анализ результатов показал, что полученные значения энергозатрат для стадийного процесса достаточно хорошо аппроксимируются показательными кривыми вида (рис. 5):

для электроимпульсного воздействия

$$E_S = C_1 (C_2 l^k + 1) \quad (2)$$

для электрогидроимпульсного воздействия

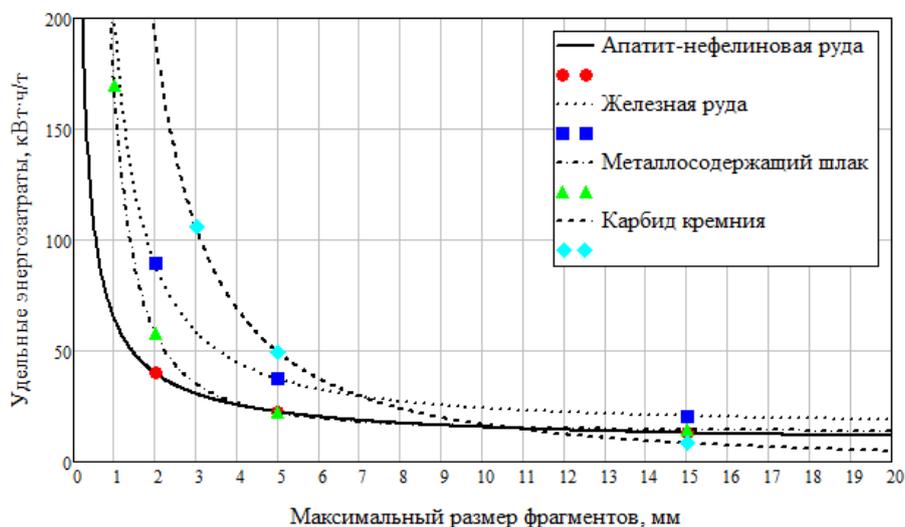
$$E_S = C_1 (C_2 l^k - 1), \quad (3)$$

где  $E_S$  — энергоёмкость доведения материала до предельного крупного размера фрагментов, ограничиваемого диаметром отверстий сита на данной стадии, кВт·ч/т;  $l$  — диаметр отверстий сита, определяющий максимальный размер получаемого продукта измельчения, мм;  $C_1, C_2, k$  — коэффициенты, зависящие от технологических и энергетических параметров процесса дробления.

В программном комплексе MathCAD с помощью функции genfit() по методу наименьших квадратов были подобраны коэффициенты для зависимостей удельной энергии разрушения, наилучшим образом совпадающих с экспериментальными данными. Полученные коэффициенты и параметры электроимпульсного воздействия представлены в табл. 3.

Низкие относительно других образцов удельные энергозатраты на разрушение карбида кремния в первой стадии объясняются характерным размером сростков кристаллов (пластинчатые, порядка 1 см в длину) и хрупкостью их конгломератов. В основании сростки соединяются только хрупкой

матрицей из смеси кристаллов с непрореагировавшим графитом, однако уже после достижения крупности дробления в 5 мм энергозатраты на разрушение SiC начинают превышать энергозатраты на электроимпульсную дезинтеграцию руд и шлака, что характерно для электрогидроимпульсного метода разрушения.



**Рис. 5.** Зависимости удельных энергетических затрат на разрушение исследованных материалов от максимального размера фрагментов продукта

**Fig. 5.** Dependences of specific energy consumption for the destruction of the studied materials on the maximum size of the product fragments

Таблица 3

Коэффициенты для описания характеристик удельных энергозатрат  
 Coefficients to describe the characteristics of specific energy consumption

Материал	Напряжение воздействия, кВ	Энергия в импульсе, Дж	$C_1$	$C_2$	$k$
Железная руда	315	1400	15,648	11,931	1,340
Медно-никелевый шлак	224	720	13,260	11,810	1,797
Апатит-нефелиновая руда	315	1400	6,169	9,492	0,798
Карбид кремния	45	2000	1,990	269,793	1,458

Требуются дальнейшие исследования для того, чтобы определить, от каких геометрических параметров образцов и технологических параметров установки зависят значения полученных коэффициентов. На данном этапе можно предположить, что коэффициент  $C_2$  реагирует на степень проявления проводимости у материалов, поскольку его значение уменьшается с переходом от полупроводящего карбида кремния к практически непроводящей апатит-нефелиновой руде, состоящей из фторфосфата кальция и алюмосиликатов натрия и калия.

## Выводы

Проведённые исследования энергозатрат на разрушение различных естественных и искусственных материалов электроимпульсным и электрогидроимпульсным методами показали возможность использования моделей «размер-энергия» для описания зависимостей эффективности дробления материалов от крупности конечного продукта. Однако для раскрытия и уточнения параметров, входящих в выражения для данных моделей, требуется проведение более детальных исследований.

Анализ удельных энергозатрат на дробление различных материалов также позволяет выделить одну общую черту, присущую разрушению всех представленных в работе образцов, — резкое снижение дробимости материалов и эффективности процесса при достижении крупности разрушения менее 2 мм, что может указывать на границу целесообразности применения электрофизических методов разрушения в целом. Использование этих методов для получения более мелкого продукта может быть оправдано только в случае специфических условий, где проявляются их преимущества по сравнению с механическим дроблением, например, при измельчении особо твёрдых материалов, сильно изнашивающих металлические мелющие тела.

#### Список источников

1. Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses / M. Mezzetti [et al.] // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. 2018. P. 481–489.
2. Che L., Gu X., Li H. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge // Minerals Engineering. 2021. Vol. 168. P. 106942.
3. Razavian S., Rezai B., Irannajad M. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses // Advanced Powder Technology. 2014. Vol. 25, No. 6. P. 1672–1678.
4. Исследование возможности извлечения цветных металлов и производства строительных материалов из шлаков медно-никелевого производства / А. В. Светлов [и др.] // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 335–344.
5. Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. А., Мирошникова Я. А. Твёрдость главных минералов апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 408–412.
6. Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110.
7. Потокин А. С., Климов А. А. Сравнительный анализ эффективности электроимпульсного разрушения различных типов горных пород Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 92–97.
8. Оленегорское месторождение // География России: энциклопедический словарь / гл. ред. А. П. Горкин. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 800 с.
9. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И. В. Шадрунова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.
10. Hukki R. T. Proposal for a Solomonian Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond // Transactions on AIME. 1961. Vol. 220. P. 403–408.

#### References

1. Mezzetti M., Popov O., Lieberwirth H., Anders E., Voigt M., Hoske P. Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses. IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, 2018, P.481–489.
2. Che L., Gu X., Li H. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge. Minerals Engineering, 2021, Vol. 168, pp. 106942.
3. Razavian S., Rezai B., Irannajad M. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses. Advanced Powder Technology, 2014, Vol. 25, No. 6, pp. 1672–1678.
4. Svetlov A. V., Potapov S. S., Potapov D. S., Kravchenko E. A., Erohin Yu. V., Potokin A. S., Selivanova E. A., Suvorova O. V., Kumarova V. A., Nesterov D. P., Makarov D. V., Masloboev V. A. Issledovanie vozmozhnosti izvlechenija cvetnyh metallov i proizvodstva stroitel'nyh materialov iz shlakov medno-nikelevogo proizvodstva [Study of possibility of extraction of non-ferrous metals and production of construction materials from slags of copper-nickel production]. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta [MSTU Bulletin], 2015, Vol. 18, No. 2, pp. 335–344. (In Russ.).

5. Neradovskij Ju. N., Kompanchenko A. A., Miroshnikova Ja. A. Tverdest' glavnyh mineralov apatit-nefelinovyh rud Hibinskih mestorozhdenij [Hardness of the main minerals of apatite-nepheline ores of Khibiny deposits]. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN* [Proceedings of the Fersman scientific session of the Institute of the KSC RAS], 2019, No. 16, pp. 408–412. (In Russ.).
6. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Issledovanie gornyh porod s obogatitel'nyh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce jelektroimpul'snoj dezintegracionnoj ustanovki [Study of rocks from enrichment plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric-pulse disintegrating unit]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Serija: Tehnicheskie nauki* [Proceedings of Kola Scientific Center of RAS. Series: Technical Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3, pp. 97–110. (In Russ.).
7. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Issledovanie gornyh porod s obogatitel'nyh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce jelektroimpul'snoj dezintegracionnoj ustanovki [Comparative analysis of efficiency of electric pulse destruction of different types of rocks in Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Serija: Tehnicheskie nauki* [Proceedings of Kola Scientific Center RAS. Series: Technical Sciences], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 92–97. (In Russ.).
8. Olenegorskoe mestorozhdenie [Olenegorskoye field]. Geografija Rossii [Geography of Russia]. Moscow, *Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija*, 1998, 800 p.
9. Shadrinova I. V., Ozhogina E. G., Kolodezhnaja E. V., Gorlova O. E. Ocenka selektivnosti dezintegracii metallurgicheskikh shlakov [Evaluation of selectivity of metallurgical slag disintegration]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and Technical Problems of Mineral Mining], 2013, No. 5, pp. 180–190. (In Russ.).
10. Hukki R. T. Proposal for a Solomonic Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond. Transactions on AIME, 1961, Vol. 220, pp. 403–408.

#### **Информация об авторах**

**А. А. Климов** — младший научный сотрудник;

**В. Н. Селиванов** — кандидат технических наук, директор.

#### **Information about the authors**

**A. A. Klimov** — Researcher;

**V. N. Selivanov** — PhD (Engineering), Director.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.  
The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.

