Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

1/2017 (8)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 14

Апатиты
2017

Российская Академия Наук

Труды Кольского научного центра

1/2017 (8)
издается с декабря 2010 г.

УДК 621.314

ISSN 2307-5252

Главный редактор — д. г.-м. н., проф.
Ю. Л. Войтеховский
Заместители главного редактора:
д. г.-м. н., проф. В. П. Петров,
д. т. н., проф. Б. В. Ефимов

Редакционный совет:
академик РАН Г. Г. Матишов,
академик РАН Н. Н. Мельников,
чл.-корр. РАН В. К. Жиров,
чл.-корр. РАН А. Н. Николаев,
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин,
д. т. н. В. А. Маслобоев,
д. г.-м. н. В. П. Петров (зам. главного редактора),
д. т. н. В. А. Путилов,
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,
к. г.-м. н. А. Н. Виноградов (отв. секретарь)

Редколлегия серии «Энергетика»:
д. т. н. Б. В. Ефимов (отв. ред., энергетика),
д. т. н. А. А. Жамалетдинов (электрофизика),
д. т. н. Н. В. Коровкин
(теоретическая электротехника),
д. т. н. Ф. Х. Халилов (электроэнергетика),
к. т. н. А. Н. Данилин (электроэнергетика),
к. т. н. Н. М. Кузнецов (энергетика),
к. т. н. В. А. Минин (возобновляемые
источники энергии),
к. т. н. В. Н. Селиванов (электроэнергетика),
к. т. н. А. Ф. Усов (электротехнологии)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 14

Научное издание

Редактор: Е. Н. Еремеева
Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 28.04.2017. Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 15,4. Заказ № 12. Тираж 100 экз.
ФГБУН КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14

184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14,
Кольский научный центр РАН
Тел.: (81555) 79393, 79380, факс: (81555) 76425
E-mail: admin@admksc.apatity.ru, http://www.kolasc.net.ru

© Центр физико-технических проблем энергетики Севера, 2017
© Кольский научный центр РАН, 2017

ТРУДЫ
Кольского научного центра РАН

ЭНЕРГЕТИКА
выпуск 14

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Данилин А. Н., Ивонин В. В. — Развитие ионизационно-перегревной неустойчивости в грунтах……..…….. 7

Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Прокопчук П. И. — Результаты полевых испытаний нового прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи импульсным методом…….. 12

Усов А. Ф. — Пример из опыта анализа зарубежных патентов по тематике электроимпульсного разрушения материалов…….. 30

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Селиванов В. Н., Баранник М. Б., Билин В. А., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Сахаров Я. А. — Исследование гармонического состава тока в нейтрали трансформатора в периоды геомагнитных возмущений……... 43

Залесова О. В. — Экспериментальное исследование гармонического состава тяговых токов……. 52

Еремич Я. Э., Пашичева С. А., Халилов Ф. Х. — Проблемы электромагнитной совместимости сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения, техносферы и биосферы…….. 57

Еремич Я. Э., Пашичева С. А., Халилов Ф. Х. — К вопросу электромагнитной совместимости и надежности элементов в сетях 0.4–35 кВ..... 67

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Кузнецов Н. М., Клюкин А. М., Трибуналов С. Н.	Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Мурманской области……..	77
Ярошевич В. В., Карпов А. С., Фастий Г. П., Шиханов И. С.	Алгоритм исследования эффективности работы участка сети……...	87

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Минин В. А., Рожкова А. А.	Оценка эффективности внедрения ветроэнергетических установок на дизельных электростанциях в Арктической зоне РФ…….	93
Минин В. А., Никифорова Г. В.	Перспективы применения аккумуляторов тепловой энергии в системах теплоснабжения с участием ветроэнергетических установок…	100
Бежан А. В.	Разработка алгоритма управления энергокомплексом, состоящим из котельной, ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора……...	107

Russian Academy of Sciences

1/2017 (8)

transactions of the Kola Science Centre

UDC 621.314

ISBN 978-5-91137-290-3

Editor-in-Chief – Yu. L. Voitekhovskiy, Dr. Sc. (Geology & Minerology), Prof.
Deputy Editors-in-Chief:
V. P. Petrov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
B. V. Efimov, Dr. Sc. (Engineering)

Editorial Council:
G. G. Matishov, Acad. of RAS,
N. N. Melnikov, Acad. of RAS,
V. K. Zhirov, Cor. Member of RAS,
A. N. Nikolaev, Cor. Member of RAS,
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),
V. P. Petrov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
V. A. Putilov, Dr. Sc. (Engineering),
Ye. D. Tereshchenko, Dr. Sc. (Physics & Mathematics),
A. N. Vinogradov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy) — Executive Secretary

ENERGY TECHNOLOGY

Series 14

Editorial Board of Energy Technology Series:
B. V. Efimov, Dr. Sc. (Eng.), Executive Editor, power industry,
A. A. Zhamaletdinov, Dr. Sc. (Eng.), electrophysics,
N. V. Korovkin, Dr. Sc. (Eng.), theoretical electrotechnology,
F. Ch. Khalilov, Dr. Sc. (Eng.), power engineering,
A. N. Danilin, PhD (Eng.), power engineering,
N. M. Kuznetsov, PhD (Eng.), energy technology,
V. A. Minin, PhD (Eng.), renewable energy,
V. N. Selivanov, PhD (Eng.), power engineering,
A. F. Usov, PhD (Eng.), electrotechnology

14, Fersman str., Apatity, Murmansk Region, 184209, Russia
Tel. (81555) 79380. Fax: (81555) 76425
E-mail: admin@admksc.apatity.ru, http://www.kolasc.net.ru

© Centre of Physical and Technical Problems of Northern Energetics, 2017
© Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2017

TRANSACTIONS
of the Kola Science Centre
ENERGY TECHNOLOGY
Series 14

CONTENTS

Pages

PHYSICO-TECHNICAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING

Danilin A. N., Ivonin V. V. — Development of ionization-overheating instability in soils…….. 7

Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N., Prokopchuk P. I. — Results of field test of a new device for measuring tower grounding resistance using the impulse method……..... 12

Usov A.F. — The example from experience of analysis of foreign patents on electric pulse destruction of materials…….. 30

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Selivanov V. N., Barannik M. B., Bilin V. A., Efimov B. V., Kolobov V. V., Sakharov Ya. A. — Analysis of frequency response of neutral current in transformer under geomagnetic disturbance……. 43

Zalesova O. V. — Experimental research of traction currents harmonic composition…… 52

Eremich Ya. E., Pashicheva S. A., Khalilov F. Kh. — Issues of electromagnetic compatibility in HV, EHV and UHV power systems, technosphere and biosphere…….. 57

Eremich Ya. E., Pashicheva S. A., Khalilov F. Kh. — Electromagnetic compatibility and elements reliability of 0.4–35 kV electrical networks……. 67

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY CONSERVATION

Kuznetsov N. M., Klyukin A. M., Tribunalov S. N. — Energy saving and energy efficiency increase in the Murmansk Region……... 77

Yaroshevich V. V., Karpov A. S., Fastiy G. P., Shikhanov I. S. — Algorithm of power system section efficiency investigation…… 87

RENEWABLE ENERGY

Minin V. A., Rozhkova A. A. — The assessment of efficiency of wind turbines adoption into diesel power plants in the Arctic Zone of the Russian Federation……..…….... 93

Minin V. A., Nikiforova G. V. — Prospects for thermal energy accumulators application in heating systems involving wind turbines…… 100

Bezhan A. V. — Development of algorithm of boiler, wind turbine and heat accumulator energy complex control…. 107

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 621.311

А. Н. Данилин, В. В. Ивонин

РАЗВИТИЕ ИОНИЗАЦИОННО-ПЕРЕГРЕВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ГРУНТАХ

Аннотация

Экспериментально исследованы зависимости критической напряженности электрического поля от длительности приложенного импульса. Определены зависимости временной задержки начала нелинейных процессов в грунтах от амплитуды импульса и влажности грунта. Показано, что на электроде развивается ионизационно-перегревная неустойчивость, которая приводит к контракции тока и образованию плазменных каналов.

Ключевые слова:

искрообразования в грунте, ионизация грунта, заземление, концентрированный электрод, ионизационно-перегревная неустойчивость.

A. N. Danilin, V. V. Ivonin

DEVELOPMENT OF IONIZATION-OVERHEATING INSTABILITY IN SOILS

Abstract

Dependence of the critical electric field on pulse duration has been studied. Dependences of ionization time delay on pulse amplitude and soil moisture have been determined. It has been shown that ionization-overheating instability develops near electrode. Instability leads to current contraction and formation of plasma channels.

Keywords:

sparking in soil, soil ionization, grounding, optical investigation, ionization-overheating instability.

При растекании больших импульсных токов в грунте как электрические свойства самого грунта, так и характеристики заземления могут существенно отличаться от величин, полученных при растекании слабого стационарного тока. Это связано с ионизацией грунта вблизи электрода и образованием искровых каналов, что приводит к заметному снижению удельного сопротивления грунта ρ [1–3]. При увеличении импульсного тока в грунте происходит ионизация и образуются искры, в результате чего сопротивление заземления уменьшается, а динамическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) становится нелинейной.

Причиной ионизации является достаточно сильное электрическое поле проводимости $E = \rho j$, которое возникает при растекании импульсного тока с плотностью j с одиночного заземлителя [4].

Очевидно, что точное моделирование переходных характеристик грунтов и анализ растекания токов вокруг заземлителей является актуальной задачей в энергетике. Однако расчет сопротивления ЗУ является сложной задачей из-за сложной структуры и нелинейной ВАХ грунтов.

Все существующие на данный момент модели искрообразований в грунтах можно условно разделить на два типа: математические и физические. В первых авторы пытаются описать математически изменение удельного сопротивления грунта при возникновении искровых каналов. К этому типу относятся модели Liew & Darveniza [4] и Wang [5] В моделях второго типа авторы объясняют физические процессы, происходящие в грунтах при искрообразованиях, и их влияние на импульсное сопротивление заземления. К данным моделям можно отнести работы Sekioka [6] и Cooray [7].

Все описанные модели основаны на некоторых допущениях и предположениях, одно из которых заключается в том, что вокруг проводника в грунте при напряженностях электрического поля, превышающих критическое значение, начинается ионизационный процесс и возникает многослойная ионизированная зона грунта с плавно изменяющейся в зависимости от градиента напряженности проводимостью. В настоящее время для некоторых типов электродов определены значения критической напряженности электрического поля и ток, при которых начинается искрообразование. При этом необходимо учитывать, что начало развития нелинейных процессов в грунтах зависит не только от амплитуды, но и от длительности приложенного импульса, а также от параметров грунта (удельное сопротивление и влажность) [8].

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования зависимости критической напряженности электрического поля от длительности приложенного импульса.

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследования проводились в металлическом ящике с размерами 700 х 450 х 400 мм, заполненном увлажненным кварцевым песком. Изнутри емкость была покрыта медной фольгой для создания заземленного экрана. Грунт представляет собой увлажненный кварцевый песок фракцией 0–0.5 мм. Импульсы напряжения с амплитудой до 60 кВ и длительностью фронта не более 1 мкс формировались генератором импульсных напряжений (ГИН). Длительность импульса регулировалась изменением значения формирующего резистора R_2 в диапазоне от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Исследования проводились на электроде в виде шара диаметром 50 мм. Шар погружался в песок на половину диаметра с целью создания однородного электрического поля вокруг электрода. Влажность песка изменялась от 1 до 7 %, чему соответствует изменение удельного сопротивления грунта от 1290 до 470 $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Импульсы напряжения и тока регистрировались с помощью омического делителя и токового шунта, сигналы с которых подавались на цифровой осциллограф.

На рисунке 2 показана зависимость критической напряженности электрического поля от длительности импульса. Как видно из графика, при длительности импульса 50 мкс напряженность электрического поля для начала ионизации грунта будет равна 9.5 кВ/см. При использовании импульсов с длительностью 10 мкс необходимо увеличить напряженность электрического поля на 20 % для возникновения процессов ионизации.

Похожие зависимости наблюдаются при электрических пробоях в газах, из чего можно сделать вывод, что, хотя грунт представляет собой сложную среду, основные нелинейные процессы происходят в воздушных промежутках

в грунтах. Таким образом, при выполнении условия $E \geq E_{КР}$ вблизи поверхности электрода в грунтах будет развиваться ионизационно-перегревная неустойчивость, которая приводит к контракции тока в песке. Развитие аналогичной неустойчивости также происходит в объемных разрядах в газах атмосферного давления, которые сопровождаются прорастанием яркосветящихся токовых каналов [9].

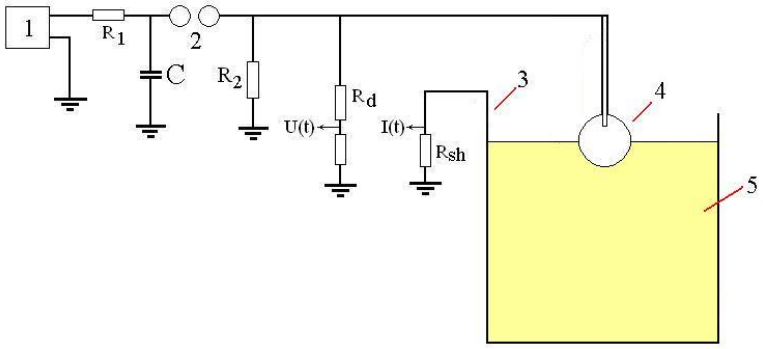


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — зарядное устройство; *2* — разрядник; *3* — заземленный бак; *4* — электрод; *5* — кварцевый песок; *C* — конденсатор; R_1 — защитный резистор; R_2 — формирующий резистор; R_d — омический делитель напряжения; R_{sh} — шунт

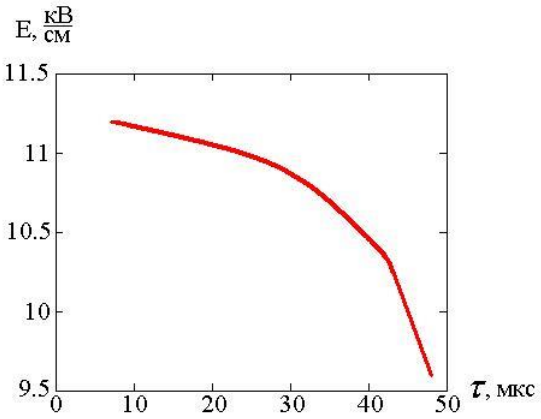


Рис. 2. Зависимость критической напряженности электрического поля от длительности приложенного импульса

На рисунке 3 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока, а также расчетное сопротивление $R(t) = \dfrac{U(t)}{I(t)}$. В случае когда напряженность электрического поля не превышает критического значения, ионизация в грунте не происходит и наблюдается обычное растекание тока с электрода. Однако при увеличении амплитуды импульса наблюдается уменьшение сопротивления электрода. Выход кривой сопротивления на минимальное значение может

занимать несколько десятков микросекунд, что обусловлено временем развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Время развития ионизационно-перегревной неустойчивости в газах составляет несколько микросекунд, после чего температура искрового канала повышается до 4000–5000 К и образуется термически ионизированная плазма [10]. Во влажном песке вода и твердые частицы имеют высокую плотность по сравнению с воздухом, поэтому на развитие неустойчивости требуется больше времени для прогрева.

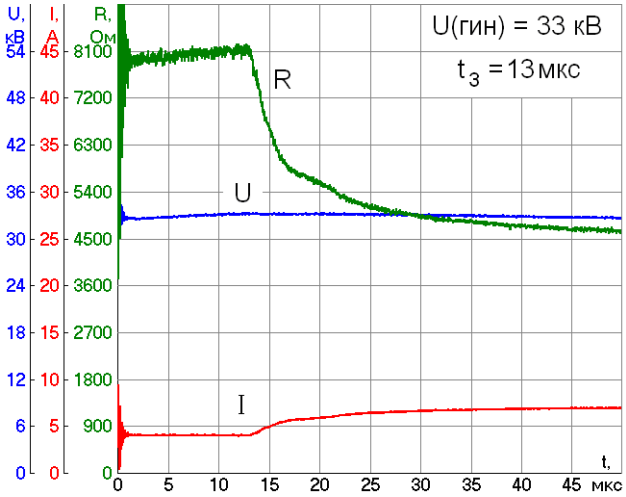


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения *U* и тока *I*, а также вычисленное динамическое сопротивление *R*

При этом, как видно из рис. 3, в случае использования полусферы в качестве электрода наблюдается задержка начала развития ионизационно-перегревной неустойчивости. На рис. 4 представлены зависимости временной задержки от амплитуды приложенного импульса. Эксперименты проводились при влажности грунта 2, 5, 7 % и удельном сопротивлении грунта 1290, 705 и 470 Ом·м соответственно.

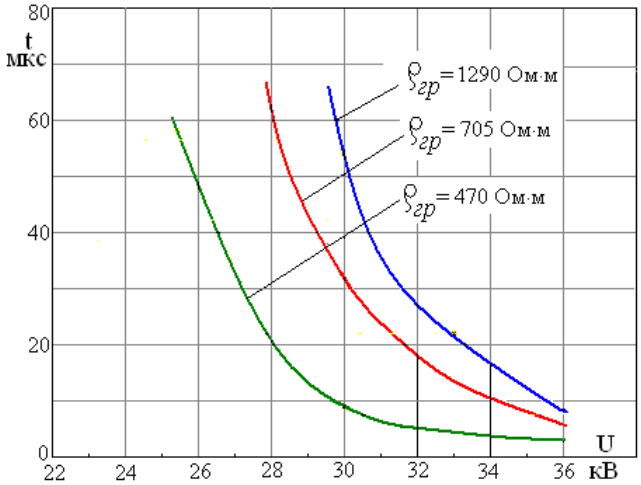


Рис. 4. Зависимость временной задержки от амплитуды приложенного импульса

Как видно из рис. 4, увеличение напряжения или степени перенапряжения ($\frac{U}{U_{КР}}$) приводит к уменьшению временной задержки. Увеличение влажности грунта приводит к уменьшению задержки в случае небольшой степени перенапряжения. Данная зависимость нивелируется при амплитуде напряжения 36 кВ.

Выводы

Развитие ионизационно-перегревной неустойчивости вблизи поверхности электрода в грунте является основной причиной искрообразования и образования плазмы, а также резкого уменьшения импульсного сопротивления заземлителя. Неустойчивость возникает в случае, когда напряженность электрического поля превышает критическое значение, при этом необходимо учитывать, что значение $E_{КР}$ зависит как от параметров приложенного импульса, так и от параметров грунта. В случае относительно однородного электрического поля вокруг электрода нелинейные процессы в грунтах будут начинаться с некоторой задержкой, которая зависит от амплитуды приложенного импульса, в случае небольшой степени перенапряжения — от влажности грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(проект № 16-38-00443).

Литература

1. Оптические исследования искровых каналов в грунте при растекании импульсного тока / В. В. Ивонин, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 50–54.
2. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1978. 225 с.
3. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading / L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, E. E. Son, B. V. Efimov, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, V. V. Ivonin // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. P. 285201.
4. Liew A. C., Darveniza M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths // Proc. IEE. 1974. Vol. 121 (2). P. 123–35.
5. Wang J., Liew A. C., Darveniza M. Extension of dynamic model of impulse behaviour of concentrated grounds at high currents // IEEE Trans. Power Deliv. 2005. Vol. 20. P. 2160–2065.
6. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization / S. Sekioka, M. Lorentzou, M. P. Philippakou, J. M. Prousalidis // IEEE Trans. Power Deliv. 2006. Vol. 21. P. 194–201.
7. Physical model of surge-current characteristics buried vertical rods in the presence of soil ionization / V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu // J. Electrostat. 2004. Vol. 60. P. 193–202.
8. Данилин А. Н., Ивонин В. В., Куклин Д. В. Лабораторные исследования процессов искрообразования в увлажненном грунте в зависимости от амплитуды и длительности импульсного напряжения на заземленном устройстве // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2013. № 4 (17). С. 38–55.

9. Электрический пробой при растекании импульсного тока в песке / Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. А. Панов, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 20–25.
10. Оптические изображения искровых каналов при растекании импульсных токов в грунте / В. В. Ивонин, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4, № 4. С. 355–361.

Сведения об авторах

Данилин Аркадий Николаевич,
заведующий лабораторией высоковольтной электроэнергетики и технологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: danilin@ien.kolasc.net.ru

Ивонин Виктор Владимирович,
инженер-исследователь Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: ivoninviktor@mail.ru

УДК 621.311

В. В. Колобов, М. Б. Баранник, В. Н. Селиванов, П. И. Прокопчук

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ НОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация

Рассмотрен новый прибор для измерения стационарного сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) импульсным методом. Приведены результаты испытаний (в том числе сравнительных) опытного образца прибора на моделях заземлителей различной конфигурации и на заземляющих устройствах опор ВЛ (с грозозащитным тросом и без), расположенных в грунтах с различным удельным сопротивлением.

Ключевые слова:

импульсный метод измерения сопротивления заземляющих устройств, импульсное сопротивление, стационарное сопротивление, опоры воздушной линии электропередачи, грозозащитный трос, результаты полевых испытаний, различное удельное сопротивление грунта.

V. V. Kolobov, M. B. Barannik, V. N. Selivanov, P. I. Prokopchuk

RESULTS OF FIELD TEST OF A NEW DEVICE FOR MEASURING TOWER GROUNDING RESISTANCE USING THE IMPULSE METHOD

Abstract

A new device for measuring grounding resistance using the impulse method, has been described. Field test results of impulse impedance and low-frequency grounding resistance, obtained for different concentrated electrodes, 150 kV towers with or without overhead ground wires in the areas with different soil resistivity, are presented.

Keywords:

impulse method of grounding resistance measuring, impulse impedance, low-frequency grounding resistance, transmission towers, overhead ground wire, field test results, different soil resistivity.

Уже много лет Центр физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН занимается исследованиями по разработке методик и комплексов для измерения сопротивлений заземляющих устройств (ЗУ) опор ВЛ импульсным методом [1]. С 2014 г. разрабатываются научные основы и методы диагностики ЗУ объектов электроэнергетики с использованием компактных импульсных источников на основе индуктивных накопителей энергии (ИНЭ). Исследования в рамках данной НИР проводились по двум направлениям.

Первое — проведение теоретических и экспериментальных исследований по разработке генераторов импульсных токов (ГИТ) малой мощности на основе ИНЭ. Определяющим фактором применения ГИТ на основе ИНЭ при диагностике ЗУ является описываемый законами коммутации принцип непрерывности во времени потокосцепления в индуктивности, согласно которому запас энергии магнитного поля в катушке индуктивности и ток в индуктивности не могут измениться скачком. Следовательно, ГИТ на основе ИНЭ способен обеспечить постоянство амплитуды импульса в токовом контуре (линии с током) на интервале времени, достаточном для проведения измерений, при изменяющихся параметрах нагрузки, т. е. независимо от согласования волнового сопротивления линии с заземляющим электродом и распределения волнового сопротивления вдоль нее.

Индуктивный накопитель энергии обладает значительно большей по сравнению с емкостными накопителями запасаемой удельной энергией, что позволяет при аналогичных массогабаритных параметрах ГИТ повысить энергию импульса тока через ЗУ и увеличить соотношение полезный сигнал/помеха на входе измерительной части устройства, что, в свою очередь, делает возможным проведение измерений при размещении ЗУ и токового электрода в плохо проводящих грунтах.

Кроме того, ГИТ с ИНЭ имеет внешнее управление, позволяет с точностью до единиц наносекунд синхронизировать момент запуска генератора и измерительной части комплекса, обеспечивает регулировку энергетических параметров выходного импульса тока.

В ходе выполнения НИР были проведены:

- анализ конструкционных и технологических факторов, влияющих на параметры индуктивных накопителей;
- исследования различных схемных решений импульсных источников тока с ИНЭ и способов накачки и отведения энергии от индуктивного накопителя;
- анализ типов и параметров ключевых элементов коммутаторов ИНЭ с целью разработки оптимальной схемы ГИТ на основе новейших типов IGBT- и MOSFET-транзисторов;
- исследования магнитных материалов для сердечника индуктивного накопителя, обеспечивающих максимальную удельную энергоемкость и высокую добротность ИНЭ.

На основе проведенных исследований была разработана схема ГИТ с ИНЭ и выбрана элементная база основных узлов и блоков. Результаты проведенных исследований опубликованы, в частности, в работах [2, 3].

Второе направление выполненных исследований — разработка алгоритмов, позволяющих на основе экспериментально полученных временных зависимостей тока через ЗУ $I_{ЗУ}(t)$, падения напряжения на ЗУ $U_{ЗУ}(t)$ и расчетной

кривой мгновенного сопротивления $Z(t)$ (рис. 1, *а*), определять параметры элементов простейшей схемы замещения сосредоточенного ЗУ при импульсном воздействии (рис. 1, *б*), в частности, эквивалентное сопротивление $R_Э$, соответствующее стационарному сопротивлению ЗУ, измеренному на переменном токе.

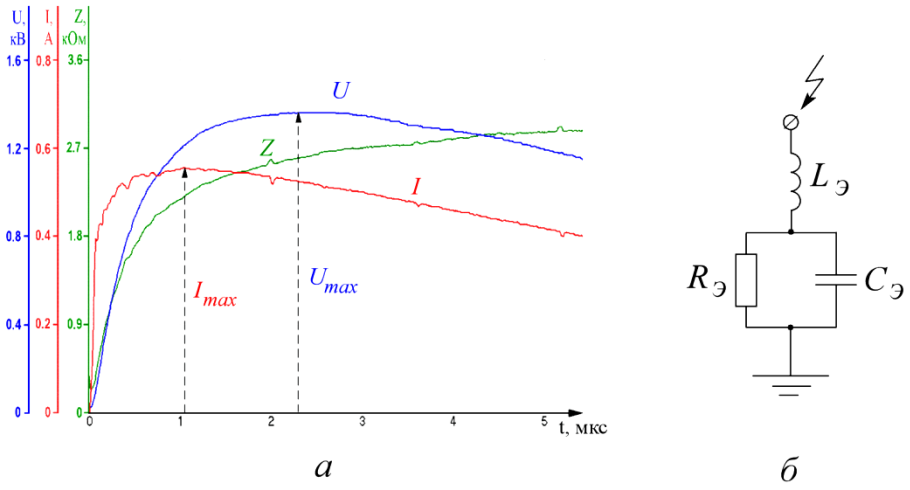


Рис. 1. Экспериментальные кривые тока через ЗУ $I(t)$, напряжения на ЗУ $U(t)$ и мгновенного (переходного) сопротивления $Z(t)$ (*а*) и простейшая схема замещения сосредоточенного заземлителя при импульсном воздействии (*б*)

На основе объединенных результатов проведенных исследований по перечисленным направлениям были разработаны принцип действия, функциональная и принципиальная схемы генераторно-измерительного комплекса для экспериментального определения параметров заземляющих устройств импульсным методом с использованием генератора импульсных токов на основе ИНЭ [4].

Одним из возможных вариантов практического применения разработанного измерительного комплекса является его использование для измерения сопротивления ЗУ опор ВЛ, находящихся под грозозащитным тросом. В 2016 г. был получен патент Российской Федерации на полезную модель «Устройство для измерения сопротивлений заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи без отсоединения грозозащитного троса» [5]. Основным отличием заявленного устройства является использование ГИТ на основе ИНЭ с применением в качестве ключа-коммутатора ИНЭ высоковольтного IGBT- или MOSFEET-транзистора. Вследствие преимуществ ГИТ с ИНЭ, рассмотренных выше, заявленное устройство снижает требования к качеству заземления (сопротивлению) токового электрода и позволяет проводить измерения сопротивления ЗУ опор ВЛ, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов, характерных, в частности, для арктических регионов России.

Также в 2016 г. были закончены работы над опытным образцом прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств импульсным методом. Структурная схема устройства приведена на рис. 2.

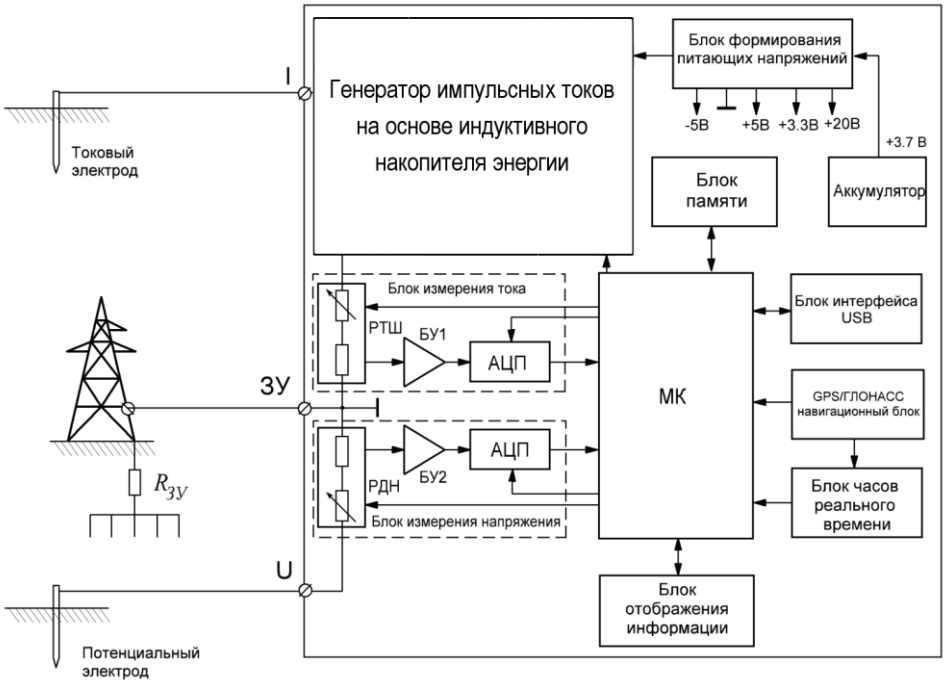


Рис. 2. Структурная схема измерителя сопротивления ЗУ импульсным методом: РТШ — регулируемый токовый шунт; РДН — регулируемый делитель напряжения; БУ1, 2 — буферные усилители; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; МК — микроконтроллер

Первичным результатом измерений, выполняемых прибором, являются экспериментальные кривые $I_{ЗУ}(t)$ и $U_{ЗУ}(t)$, сохраненные в цифровом виде в памяти микроконтроллера.

На основе этих данных вычисляются:

- кривая мгновенного сопротивления $Z(t)$;
- максимальные значения импульсов тока и напряжения (U_{max}, I_{max});
- значения элементов простейшей схемы замещения ЗУ ($R_{ЭКВ}$, $L_{ЭКВ}$, $C_{ЭКВ}$);
- величина R_{max}, равная отношению пикового (максимального) значения напряжения на ЗУ к пиковому (максимальному) значению тока через ЗУ, которые в общем случае наблюдаются неодновременно (рис. 1, *а*), и соответствующая определению для условного импеданса заземления согласно [6] или импульсному сопротивлению в соответствии с [7].

Основные технические характеристики опытного образца прибора, разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН, приведены в табл. 1.

Так как при импульсных измерениях токовый контур обладает волновыми свойствами, далее для краткости проводники, соединяющие измерительный прибор с токовым и потенциальным электродами, будем обозначать как токовая и потенциальная линии. Измерения выполняются прибором по двухлучевой схеме при ортогональном расположении токовой и потенциальной линии, как показано на рис. 3, *а*.

Таблица 1

Основные технические характеристики опытного образца прибора для измерения сопротивления ЗУ импульсным методом

Характеристика	Численное значение
Параметры импульса тока	
энергия импульса	1 Дж
амплитуда импульса	До 5 А
длительность фронта	0.1–0.2 мкс
длительность до полуспада	50 мкс (при сопротивлении токового контура 1 кОм)
Амплитуда напряжения на ЗУ	До 5.5 кВ
Диапазон измерения сопротивления ЗУ	0–5000 Ом
Рабочий диапазон температур	от -20 до +50 °С
Размеры / масса	195 × 145 × 67 мм / 1 кг

а б

Рис. 3. Схема проведения измерений (*а*) и внешний вид опытного образца прибора для определения сопротивления ЗУ импульсным методом (*б*)

На рисунке 3, *б* приведен внешний вид опытного образца прибора для измерения сопротивления ЗУ импульсным методом.

В 2015–2016 гг. были проведены испытания опытного образца разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН измерителя сопротивления ЗУ импульсным методом на моделях заземлителей различной конфигурации и испытания в условиях, имитирующих реальные условия эксплуатации. В ходе последних измерялись сопротивления ЗУ опор ВЛ, находящихся под грозозащитным тросом, и опор без грозотроса, расположенных в грунтах с различным удельным сопротивлением. Часть результатов испытаний была представлена в докладе «Полевые испытания прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ без отсоединения грозозащитного троса» на V Международной конференции по молниезащите, проходившей 17–19 мая 2016 г. в Санкт-Петербурге [8].

В данной статье более подробно рассмотрим проведенные испытания опытного образца измерителя сопротивления ЗУ импульсным методом и их результаты.

Согласно «Методическим указаниям по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок» [9] в случае невозможности или нецелесообразности отсоединения от тела опоры грозозащитного троса, измерение сопротивления заземлителя опоры может выполняться тремя методами: 1) с помощью токоизмерительных клещей (трансформаторов тока); 2) методом СибНИИЭ; 3) импульсным методом МЭИ — ЭЛНАП.

Из-за отсутствия соответствующего оборудования первый метод в ходе испытаний не использовался.

Были проведены измерения сопротивления заземлителя опоры ВЛ 150 кВ, соединенной грозотросом с соседними опорами. Измерения ЗУ опоры с помощью прибора, разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН, проводились по схеме, приведенной на рис. 3, *а*. Длины токовой и потенциальной линии составляли 50 м (рис. 4, *а*). В качестве электродов использовались стальные стержни диаметром 20 мм и длиной 120 см, которые погружались на глубину до 100 см. Сопротивление электродов измерялось относительно опоры двухточечным методом приборами ИСЗ-2016 и Ф4103-М1.

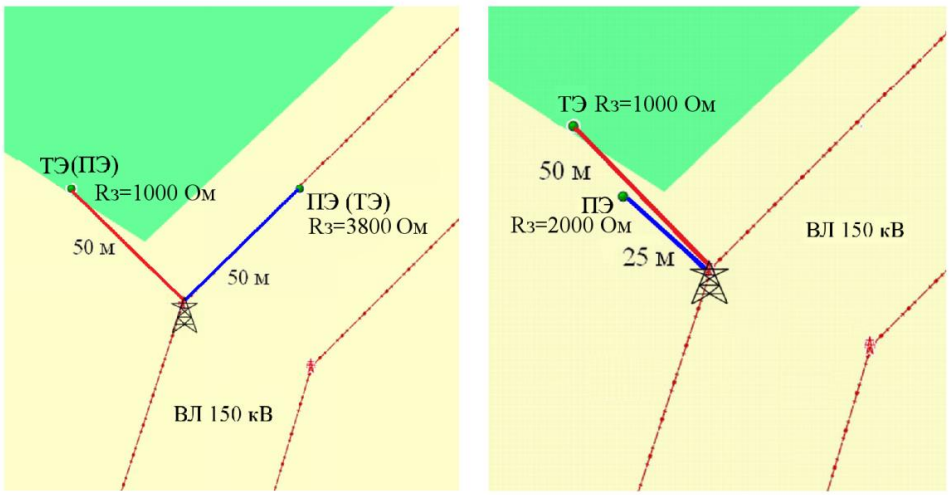


Рис. 4. Схема проведения измерений сопротивления ЗУ опоры ВЛ, соединенной грозозащитным тросом с двумя соседними с помощью прибора ЦФТПЭС КНЦ РАН (*а*) и комплекса «ИК-1» ООО «НПФ ЭЛНАП» (*б*)

Измеритель сопротивления заземления ИСЗ-2016 позволяет проводить измерения сопротивления в диапазоне до 1999 Ом. Тестовый ток и напряжение составляют 10 мА и 25 В соответственно (среднеквадратическое значение). Частота тестового синусоидального сигнала составляет 125/75/41.66 Гц [10].

Цифровой измеритель сопротивления заземления Ф4103-М1 предназначен для измерения сопротивления ЗУ и удельного сопротивления грунтов по двухточечной или трехточечной схеме в диапазоне 0–15 кОм. Прибор

позволяет проводить измерения при высоких значениях сопротивления электродов — до 12 кОм для потенциальных и до 6 кОм для токовых. Частота измерительного тока находится в пределах 265–310 Гц. Переменное напряжение на выходных зажимах Ф4103-М1 при разомкнутой внешней цепи составляет 36 В [11].

С учетом формулы для расчета сопротивления R одиночного заземлителя в виде вертикального электрода круглого сечения диаметром d и длиной l, верхний конец которого находится на поверхности грунта с удельным сопротивлением ρ [12]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}, \qquad (1)$$

можно записать выражение для удельного сопротивления окружающего электрод грунта:

$$\rho = R \frac{2\pi l}{\ln\left(4l/d\right)}. \qquad (2)$$

С учетом параметров электродов, использовавшихся при измерениях (d = 0.02 м, l = 1 м), можно записать:

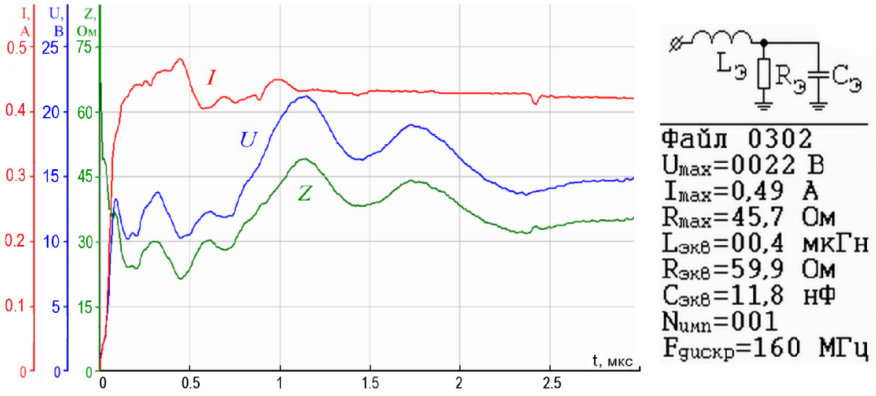
$$\rho = 1.186\, R. \qquad (3)$$

Таким образом, удельное сопротивление грунта, окружающего электрод, численно примерно равняется сопротивлению электродов. Измеренные величины сопротивлений токового и потенциального электродов составляли 1000 и 3800 Ом соответственно (рис. 4, *а*).

В ходе измерений токовая и потенциальная линии менялись местами — токовый электрод использовался как потенциальный и наоборот.

На рисунке 5 приведен пример экспериментальных зависимостей тока через ЗУ, напряжения на ЗУ, временной зависимости мгновенного (переходного) сопротивления и результаты измерения, полученные для исследуемой опоры при использовании электрода с сопротивлением 1000 Ом в качестве токового (ТЭ на рис. 4, *а*). На осциллограмме напряжения при временах от 1 мкс и выше наблюдаются отражения от соседних опор, соединенных грозотросом с исследуемой, а на осциллограмме тока при t = 0.5 мкс — отражение от конца линии с током (токового электрода).

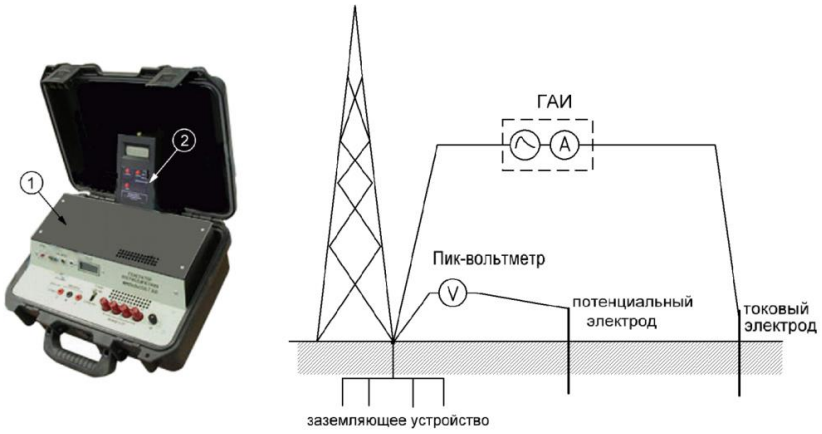
В качестве одного из сравнительных методов использовался импульсный метод МЭИ — ЭЛНАП. Измерения этим методом проводились с помощью комплекса «ИК-1» [13]. Комплекс предназначен для определения импульсного сопротивления контуров заземления отдельно стоящих молниеотводов и опор ВЛ, в том числе опор с присоединенным грозозащитным тросом, по методу МЭИ — ЭЛНАП и рекомендован к применению в «Методических указаниях по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок» [9].



а б

Рис. 5. Экспериментальные зависимости тока через ЗУ, напряжения на ЗУ, расчетная кривая мгновенного сопротивления $Z(t)$ (*а*) и результаты измерений параметров ЗУ (*б*), полученные с помощью прибора ЦФТПЭС КНЦ РАН для опоры, соединенной грозозащитным тросом с двумя соседними, при суммарном сопротивлении токового контура 1000 Ом

В состав комплекса (рис. 6, *а*) входят генератор апериодических импульсов ГАИ-3ПМ и вольтметр импульсный ВИ-6М. Генератор комплекса может питаться как от сети напряжением 220 В, так и от встроенного аккумулятора. Генератор формирует импульсы напряжения нормированной грозовой формы длительностью фронт/полуспад 1.2/50 или 8/20 мкс с частотой следования около 3 Гц. Амплитуда импульса напряжения на холостом ходу составляет 1000 В. Пик-вольтметр измеряет амплитуду импульсов напряжения в диапазоне 0–200 В. ГАИ ИК-1 имеет габариты 465 х 370 х 120 мм и массу 11 кг.



а б

Рис. 6. Внешний вид измерительного комплекса «ИК-1» (*а*) и схема измерения сопротивления ЗУ опоры ВЛ импульсным методом МЭИ — ЭЛНАП (*б*): *1* — генератор апериодических импульсов ГАИ-3ПМ; *2* — вольтметр импульсный (пик-вольтметр) ВИ-6М

Измерения сопротивления ЗУ опор ВЛ без отсоединения грозотроса комплексом «ИК-1» рекомендуется проводить по методике, приведенной в [9].

Для измерений используется однолучевая схема (рис. 6, *б*). Токовый электрод забивается на глубину 0.5 м в грунт на расстоянии 50 м от объекта измерений. С помощью пик-вольтметра ВИ-6М измеряется напряжение между потенциальным электродом и ЗУ опоры ВЛ при различных расстояниях между ними. По результатам измерений строится потенциальная кривая $U(l)$, по которой определяется установившееся значение напряжения $U_{УСТ}$. Импульсное сопротивление опоры определяется по формуле $R_{ЗУ\ ИМП} = U_{УСТ} / I_{ИЗМ}$, где $I_{ИЗМ}$ — измеренное значение импульсного тока.

В паспортных данных комплекса «ИК-1» не указан диапазон измеряемого сопротивления ЗУ, однако, с учетом максимальной амплитуды напряжения генератора импульсов 1000 В и диапазона измерения тока встроенного пикового амперметра от 1 А, можно предположить, что для корректного проведения измерений сопротивление токового контура не должно превышать 1000 Ом. Кроме того, согласно [9], при удельном сопротивлении грунта, окружающего исследуемое ЗУ, превышающем величину 300 Ом·м, рекомендуется использовать другое средство измерения.

В описываемых опытах измерения с помощью комплекса «ИК-1» проводились по упрощенной методике: токовый электрод с сопротивлением около 1000 Ом размещался на расстоянии 50 м от объекта измерений, а потенциальный — на половине этого расстояния и имел сопротивление 2000 Ом (рис. 4, *б*).

Результаты измерения сопротивления ЗУ опоры, полученные по методике МЭИ — ЭЛНАП, корректировались с учетом параллельно подключенных к ЗУ двух волновых сопротивлений участков грозотроса до соседних опор [14]:

$$R_{ИСТ} = \frac{1}{\left(1/R_{ИЗМ} - 2/Z_{WT}\right)}, \qquad (4)$$

где $R_{ИЗМ}$ — измеренное, а $R_{ИСТ}$ — истинное значение сопротивления ЗУ; Z_{WT} — волновое сопротивление «грозотрос — поверхность земли», которое численно принималось равным 400 Ом.

При проведении измерения сопротивления ЗУ опоры ВЛ, соединенной грозотросом с соседними, прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН такая корректировка происходит автоматически: перед проведением измерений в настройках прибора указывается количество грозотросов, подходящих к исследуемой опоре, и на экран выводятся уже истинные значения результатов измерения стационарного ($R_{ЭКВ}$) и импульсного ($R_{МАХ}$) сопротивлений ЗУ.

Сопротивления заземлителя опоры измерялось также методом СибНИИЭ [15], при этом в качестве измерителя применялся прибор Ф4103-М1, уже упомянутый выше.

После проведения измерений и вычисления сопротивления ЗУ опоры по методу СибНИИЭ проводилась коррекция результата с учетом поправочного множителя, предложенного С. В. Нестеровым. Корректирующий множитель учитывает размер заземлителя и то, что потенциальный электрод при измерении

по методу СибНИИЭ не находится на достаточном расстоянии от ЗУ, чтобы обеспечить нулевую ошибку. Значение множителя зависит как от размеров заземлителя, так и от величины коэффициента отсоса [16].

Результаты измерений сопротивления ЗУ опоры ВЛ 150 кВ, находящейся под грозозащитным тросом, полученные с помощью описанных выше методов и приборов, приведены в табл. 2. Как видно из результатов проведенных измерений, в нашем случае методика СибНИИЭ дает завышенное значение сопротивления ЗУ опоры. Аналогичные результаты были получены в работе [17], в которой приведены результаты измерения сопротивления ЗУ опоры ВЛ на переменном токе до присоединения грозозащитного троса и результаты, полученные методом СибНИИЭ после подключения грозотроса.

Таблица 2

Результаты измерений сопротивления ЗУ опоры, соединенной грозозащитным тросом с двумя соседними, полученные с помощью различных методов и приборов при удельном сопротивлении окружающего грунта около 2000 Ом·м

Метод, прибор	Сопротивление ЗУ	Примечание к результатам измерения
Импульсный, измеритель сопротивлений ЗУ импульсным методом ЦФТПЭС КНЦ РАН	$R_{ИМП}$ = 39–46 Ом $R_{ЭКВ}$ = 53–60 Ом	В зависимости от частоты дискретизации и использования одного и того же электрода в качестве токового или потенциального
Импульсный МЭИ — ЭЛНАП, «ИК-1»	$R_{ИМП}$ = 48.5–54.5 Ом	В зависимости от взаимного расположения токового и потенциального контуров
СибНИИЭ, Ф4103-М1	77 Ом	Стационарное сопротивление
С поправкой Нестерова к методу СибНИИЭ	60 Ом	Стационарное сопротивление

С учетом поправки, предложенной Нестеровым, значение сопротивления корректируется. Измеритель ЦФТПЭС КНЦ РАН для импульсного сопротивления ЗУ показал значения (39–46 Ом) ниже, чем комплекс «ИК-1» (48.5–54.5 Ом), а для эквивалентного сопротивления ЗУ (53–60 Ом) — результаты, близкие к полученным по методу СибНИИЭ с учетом поправки Нестерова (60 Ом).

Также были проведены измерения сопротивления ЗУ опоры ВЛ 150 кВ, не имеющей грозотроса.

Измерения прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН и комплексом «ИК-1» проводились по методикам и схемам измерения, приведенным выше. Сопротивления заземляющих электродов составляли 600 и 300 Ом. Так как грозозащитный трос на исследуемой опоре отсутствовал, коррекция результатов в соответствии с выражением (4) не выполнялась.

Кроме уже описанных выше методов и приборов измерения сопротивления ЗУ опоры без грозозащитного троса проводились по трехполюсной трехпроводной схеме на переменном токе приборами Ф4103-М1, ИСЗ-2016, рассмотренными выше, и комплексом КДЗ-2. Измерительный комплекс для диагностики качества контуров заземления КДЗ-2 представляет собой генератор, позволяющий формировать через ЗУ периодический сигнал напряжением до 80 В и током до 0.2 А. Селективный вольтамперметр комплекса работает на номинальной частоте 57 Гц [18].

Результаты измерений сопротивления ЗУ не имеющей грозотроса опоры ВЛ 150 кВ, полученные с помощью различных методов и приборов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

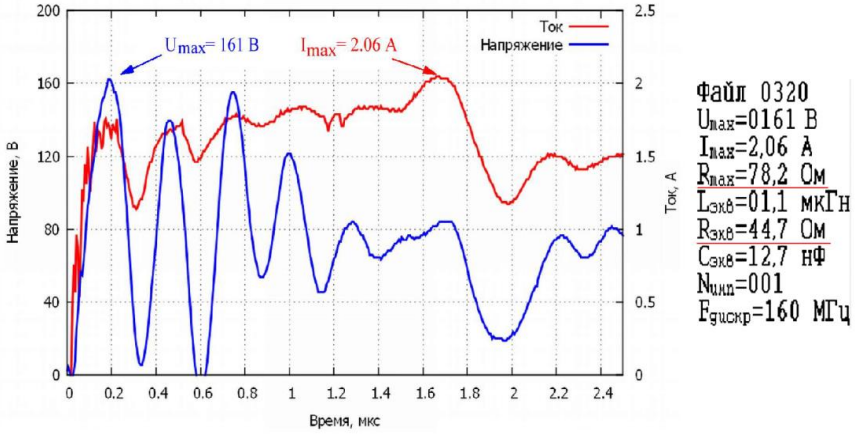
Результаты измерений сопротивления ЗУ опоры без грозозащитного троса, полученные с помощью различных методов и приборов при удельном сопротивлении окружающего грунта около 450 Ом·м

Метод, прибор	Сопротивление ЗУ	Примечание к результатам измерения
Импульсный, измеритель сопротивлений ЗУ импульсным методом ЦФТПЭС КНЦ РАН	$R_{ИМП}$ = 35–38 Ом $R_{ЭКВ}$ = 43–44.7 Ом	В зависимости от частоты дискретизации и использования одного и того же электрода в качестве токового или потенциального
Импульсный, МЭИ — ЭЛНАП, «ИК-1»	$R_{ИМП}$ = 36.2–39.6 Ом	В зависимости от взаимного расположения токового и потенциального контуров
СибНИИЭ, Ф4103-М1	55.9 Ом	Стационарное сопротивление
С поправкой Нестерова к методу СибНИИЭ	45 Ом	То же
ИСЗ-2016	46 Ом	»
Ф4103-М1	46 Ом	»
КДЗ-2	45.6 Ом	»

Анализ результатов измерений позволяет отметить, что метод СибНИИЭ, как и в предыдущем опыте, завышает значение сопротивления ЗУ. С учетом поправки, предложенной Нестеровым, значение сопротивления ЗУ корректируется в сторону уменьшения. В данном случае результаты измерений импульсного сопротивления ЗУ опоры, выполненные комплексом «ИК-1» и прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН, практически совпадают (35–39 Ом), но меньше стационарного сопротивления, измеренного традиционными методами на переменном токе (45 Ом).

В то же время результаты измерения $R_{ЭКВ}$ (43–44.7 Ом), вычисляемого на основе кривой $Z(t)$ по оригинальному алгоритму, примененному в приборе ЦФТПЭС КНЦ РАН, практически совпадают со стационарным сопротивлением ЗУ опоры, измеренном на переменном токе.

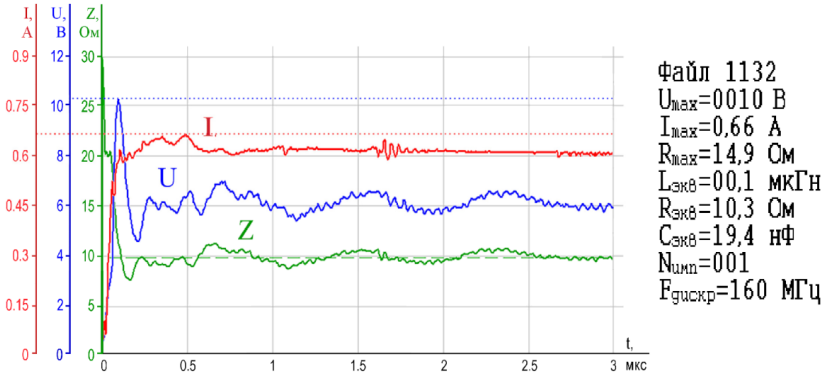
В ходе описанных испытаний нового прибора кроме двухлучевой схемы расположения токового и потенциального электрода использовалась и однолучевая. Показательны экспериментальные зависимости тока через ЗУ, напряжения на ЗУ (*а*) и результаты измерений параметров ЗУ (*б*), полученные с помощью прибора ЦФТПЭС КНЦ РАН и приведенные на рис. 7. Вследствие взаимного влияния контуров на кривых тока и напряжения присутствуют сильные искажения. При расчете импульсного сопротивления ЗУ опоры прибор показал завышенное значение: R_{MAX} = 161 В / 2.06 А = 78.2 Ом. В то же время результат измерения эквивалентного сопротивления, полученного на основе обработки кривой $Z(t)$ ($R_{ЭКВ}$ = 44.7 Ом), совпадает с результатами, полученными при измерении стационарного сопротивления ЗУ опоры другими приборами на переменном токе (табл. 3).



а б

Рис. 7. Временные зависимости тока и напряжения на ЗУ опоры без грозотроса (*а*) и результаты измерения (*б*), полученные с помощью прибора ЦФТПЭС КНЦ РАН при однолучевом расположении токового и потенциального контуров

Были проведены испытания опытного образца прибора, разработанного ЦФТПЭС КНЦ РАН, на опоре ВЛ 150 кВ, соединенной грозотросом с соседними, ЗУ которой расположено в грунте с низким удельным сопротивлением (опора находится в заболоченной местности). Кроме разработанного прибора в испытаниях использовался измерительный комплекс «ИК-1». Экспериментальные зависимости тока через ЗУ, напряжения на ЗУ, временная зависимость мгновенного (переходного) сопротивления и результаты измерения, полученные прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН, приведены на рис. 8. Из-за малого активного сопротивления ЗУ исследуемой опоры на фронте импульса наблюдается индуктивный выброс напряжения. Измеренное импульсное сопротивление с учетом волновых сопротивлений линии «грозотрос — поверхность земли» составило 14.9 Ом, тогда как величина $R_{ЭКВ}$ — 10.3 Ом.



а б

Рис. 8. Экспериментальные кривые тока через ЗУ $I(t)$, падения напряжения на ЗУ $U(t)$, расчетная кривая мгновенного сопротивления $Z(t)$ (*а*) и результаты измерения сопротивления ЗУ (*б*), полученные прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН при исследовании опоры с присоединенным грозотросом, ЗУ которой расположено в хорошо проводящем грунте

Измерения сопротивления ЗУ опоры ВЛ комплексом «ИК-1» проводились по методике, приведенной в [9]. Токовый электрод был установлен на расстоянии 50 м от исследуемой опоры. Потенциальный электрод последовательно устанавливался на расстоянии от 5 до 50 м от ЗУ опоры с шагом в 5 м (l = 5, 10, 15, 45, 50 м). С помощью пик-вольтметра измерялось напряжение между потенциальным электродом и ЗУ. Построенная по результатам измерений потенциальная кривая $U(l)$ не имела области установившегося значения напряжения ($U_{УСТ}$). Так как не было возможности увеличить расстояние токового электрода от ЗУ опоры, а расположить электроды в другом направлении от ЗУ не позволял рельеф местности, то в соответствии с [9] была построена кривая $R(L)$ зависимости значения измеренного сопротивления от расстояния до ЗУ опоры (рис. 9). Кривая $R(L)$ построена уже с учетом волновых сопротивлений линии «грозотрос — поверхность земли». Кривая имеет в средней части небольшой горизонтальный участок с сопротивлением 20 Ом. Согласно [9], за истинное значение сопротивления принимается значение R при $L = 0.5\,L_{ТЭ}$, где $L_{ТЭ}$ — расстояние до токового электрода (50 м). Сопротивление на расстоянии 25 м от ЗУ, найденное по кривой $R(L)$, составляет 18.1 Ом. Таким образом, можно считать, что сопротивление ЗУ опоры, измеренное комплексом «ИК-1», составляет 18–20 Ом, что превышает как стационарное сопротивление (10.3 Ом), так и импульсное сопротивление ЗУ (14.9 Ом), измеренные прибором ЦФТПЭС КНЦ РАН.

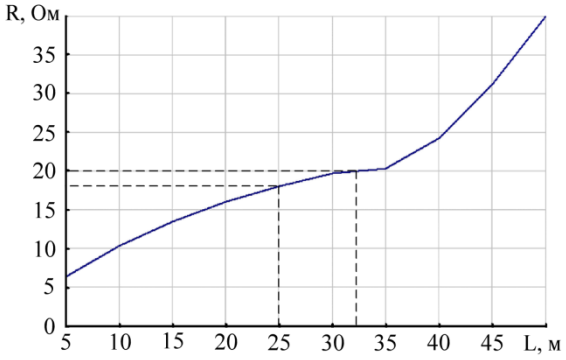
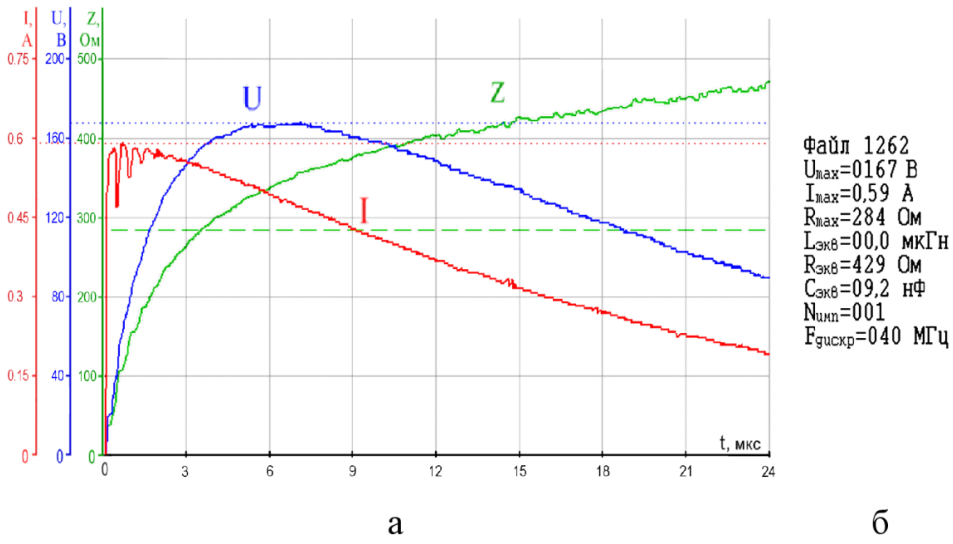


Рис. 9. Зависимость измеренного сопротивления ЗУ от расстояния потенциального электрода до ЗУ, полученная с помощью комплекса «ИК-1» при исследовании опоры, ЗУ которой расположено в хорошо проводящем грунте (расстояние от ЗУ до токового электрода 50 м)

Так как одним из преимуществ разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН измерителя сопротивления ЗУ импульсным методом является широкий диапазон измеряемых сопротивлений ЗУ (суммарное сопротивление токового контура до 5 кОм), то были проведены испытания прибора на опоре, ЗУ которой расположено в скалистом плохо проводящем грунте. Исследуемая опора ВЛ 150 кВ не имеет грозозащитного троса. На рис. 10 приведены кривые $I_{ЗУ}(t)$, $U_{ЗУ}(t)$, $Z(t)$ и результаты измерений сопротивления ЗУ. За счет значительного удельного сопротивления грунта кривые импульсов тока

и напряжения имеют ярко выраженный емкостной характер. Фронт импульса напряжения значительно затянут. Значение импульсного сопротивления ЗУ данной опоры составило 284 Ом, тогда как измеренная прибором величина $R_{ЭКВ}$ оказалась значительно больше — 429 Ом. По предварительным оценкам, полученным в процессе проведения измерений, суммарное сопротивление токового контура составляло около 3000 Ом.

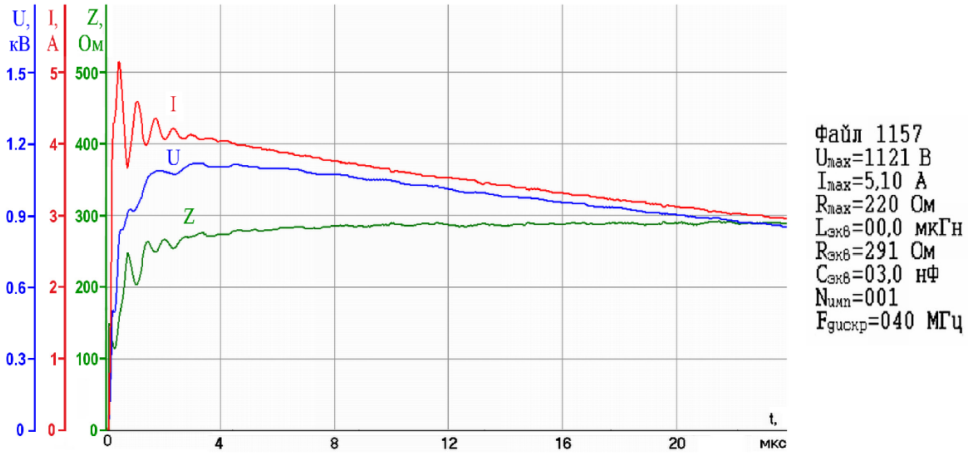


а б

Рис. 10. Экспериментальные кривые тока через ЗУ $I(t)$, падения напряжения на ЗУ $U(t)$, расчетная кривая мгновенного сопротивления $Z(t)$ (*а*) и результаты измерения сопротивления ЗУ (*б*), полученные при исследовании опоры без грозотроса, ЗУ которой расположено в скалистом плохо проводящем грунте

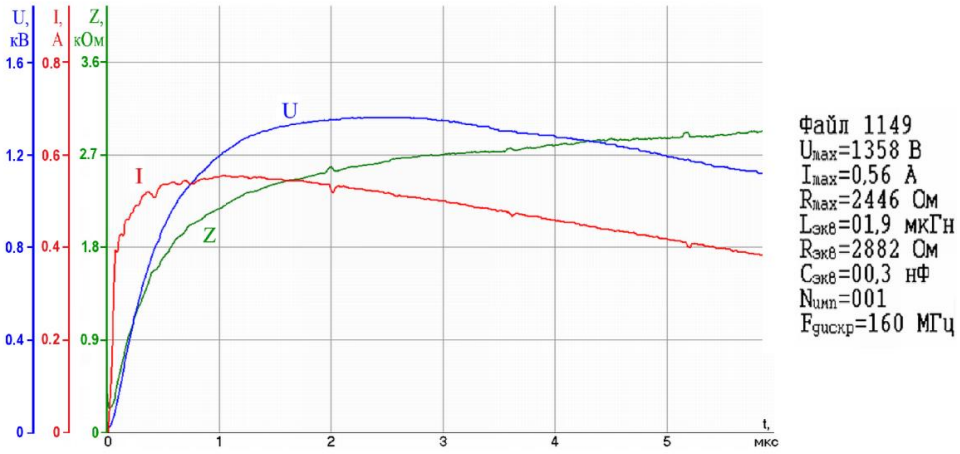
Опытный образец прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств импульсным методом был испытан на моделях заземлителей различного типа на полигоне, предназначенном для проведения экспериментальных исследований высоковольтных процессов в подземных проводниках [19]. Так, на рис. 11 приведен пример полученных с помощью разработанного прибора экспериментальных кривых тока через ЗУ и напряжения на ЗУ, расчетной кривой $Z(t)$ и результатов измерений для протяженного подземного горизонтального проводника — трубы диаметром 12 мм и длиной 13.5 м, расположенной на глубине 0.5 м в грунте с удельным сопротивлением около 2400 Ом·м. Измеренное эквивалентное сопротивление заземлителя составило 291 Ом. На рис. 12 приведены те же данные для заземлителя в виде сферы диаметром 340 мм, наполовину погруженного в грунт. Эквивалентное сопротивление, измеренное прибором, составило 2882 Ом.

Результаты измерений стационарного сопротивления заземлителей на переменном токе, выполненные прибором ИСЗ-2016, составили около 300 Ом для горизонтального проводника и 3000 Ом для полусферы.



а б

Рис. 11. Экспериментальные кривые тока через ЗУ *I*(*t*), падения напряжения на ЗУ *U*(*t*), расчетная кривая мгновенного сопротивления *Z*(*t*) (*а*) и результаты измерения сопротивления ЗУ (*б*), полученные при исследовании модели протяженного горизонтального заземлителя



а б

Рис. 12. Экспериментальные кривые тока через ЗУ *I*(*t*), падения напряжения на ЗУ *U*(*t*), расчетная кривая мгновенного сопротивления *Z*(*t*) (*а*) и результаты измерения сопротивления ЗУ (*б*), полученные при исследовании заземлителя в виде сферы, наполовину погруженного в грунт

Выводы

В целом результаты испытаний опытного образца разработанного в ЦФТПЭС КНЦ РАН измерителя сопротивлений ЗУ импульсным методом, проведенных на моделях заземлителей различной конфигурации и ЗУ опор ВЛ, находящихся под грозозащитным тросом, и опор без грозотроса, расположенных в грунтах с различным удельным сопротивлением, а так же сравнительные испытания прибора можно считать успешными.

По результатам проведенных испытаний можно отметить, что применение приборов, основанных на импульсном методе как одном из методов, позволяющих определять сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ без отсоединения грозотроса, оправдано с точки зрения их компактности и относительной простоты проведения измерений. В то же время, несмотря на то что импульсный метод МЭИ — ЭЛНАП приведен в «Методических указаниях по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок», комплекс «ИК-1» имеет ряд недостатков:

- в соответствие с методикой конечный результат получается после выполнения многократных измерений сопротивления ЗУ на разных расстояниях от опоры;
- как показали испытания, измерения, проводимые с помощью комплекса, очень чувствительны к взаиморасположению измерительных проводников и электродов;
- результатом измерения является импульсное сопротивление ЗУ, определяемое, согласно [6, 7], как отношение максимума напряжения на ЗУ к максимуму тока через ЗУ. При определении импульсного сопротивления на результат могут влиять искажения импульса напряжения на ЗУ, возникающие из-за отражений от соседних опор, и искажения импульса тока через ЗУ, вызванные отражением от токового электрода [4]. Кроме того, измеренное импульсное сопротивление ЗУ в общем случае не совпадает со стационарным сопротивлением, которое приводится в нормативных документах, определяющих допустимое значение сопротивления ЗУ. Степень различия импульсного и стационарного сопротивлений для одного и того же ЗУ, определяется, в частности, амплитудой, формой и длительностью импульса, формируемого измерительным устройством, конструкцией заземлителей, а также удельным сопротивлением грунта, окружающего ЗУ.

Испытания опытного образца измерителя сопротивлений ЗУ импульсным методом, в том числе сравнительные, проведенные на ЗУ опор ВЛ, расположенных в районах с различным удельным сопротивлением грунта, подтвердили выводы, сделанные ранее в опубликованных теоретических и экспериментальных работах, исследующих взаимосвязь между импульсными и стационарными сопротивлениями ЗУ при различных проводимостях грунтов, в частности в [20], а именно: в грунтах с хорошей проводимостью величина импульсного сопротивления ЗУ больше стационарного сопротивления, а в грунтах с плохой проводимостью, наоборот, импульсное сопротивление меньше, чем стационарное.

Проведенные испытания опытного образца прибора показали, что:

- величина угла между токовой и потенциальной линией незначительно влияет на результат измерения эквивалентного сопротивления ЗУ;
- результат измерения $R_{ЭКВ}$ практически не зависит от сопротивления токового и потенциального электродов.

Объединение в одном устройстве двух новых подходов — методологического, заключающегося в определении на основе обработки кривой мгновенного сопротивления $Z(t)$ параметров элементов простейшей схемы замещения сосредоточенного ЗУ при импульсном воздействии, и схемотехнического, заключающегося в применении генератора импульсных токов на основе индуктивного накопителя энергии, позволили разработать прибор, который определяет импульсным методом стационарное сопротивление ЗУ.

С точки зрения практического применения разработанный измеритель, по нашему мнению, может быть особенно востребован для экспериментального определения стационарного сопротивления ЗУ опор ВЛ (с грозозащитным тросом и без него) и сосредоточенных ЗУ защитных аппаратов в районах с высоким удельным сопротивлением грунта.

Литература

1. Методика импульсных измерений сопротивления растеканию заземлителей опор высоковольтных линий электропередачи под грозозащитным тросом / А. Н. Данилин, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, П. И. Прокопчук // Технико-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера: сб. науч. тр. / Кольский научный центр РАН; Центр физико-технических проблем энергетики Севера. Апатиты, 2007. С. 79-86.
2. Колобов В. В, Баранник М. Б., Селиванов В. Н. Разработка прибора для измерения импульсных характеристик заземляющих устройств объектов электроэнергетики Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2014. Вып. 8. С. 33-45.
3. Источник тока с индуктивным накопителем энергии для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств / В. В. Колобов, М. Б. Баранник, В. Н. Селиванов, Д. В. Куклин // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 61–67.
4. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н. Новый прибор для измерения сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ импульсным методом // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. Вып. 13. С. 38–54.
5. Пат. 166566 Рос. Федерация, МПК G01R27/20. № 2016124832/28. Устройство для измерения сопротивлений заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи без отсоединения грозозащитного троса / В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, М. Б. Баранник; заявитель и патентообладатель ФГБУН Кольский научный центр РАН; заявл. 21.06.16; опубл. 10.12.16, Бюл. № 34.
6. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Ч. 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2011. 46 с.
7. IEC-61024-1 (1990-04): Protection of structures against lightning – Part 1: General principles.
8. Колобов В. В., Ефимов Б. В., Баранник М. Б. Полевые испытания прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ без отсоединения грозозащитного троса // Доклады V Международной конференции по молниезащите (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2016 г.). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 150–166.

9. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок: РД 153-34.0-20.525-00. М.: СПО ОРГРЭС, 2000.
10. Описание типа средства измерений [Электронный ресурс] // Справочник измерительного оборудования: сайт. URL: http://www.kip-guide.ru/docs/30407-05.pdf (дата обращения: 03.03.2017).
11. Измеритель сопротивления заземления Ф4103-М1. Паспорт [Электронный ресурс] // Электронприбор: сайт. URL: http://www.electronpribor.ru/files/products/f4103_p_mp.pdf (дата обращения: 03.03.2017).
12. Цирель Я. А. Заземляющие устройства воздушных линий электропередачи. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
13. Измерительный комплекс для определения импульсного сопротивления контуров заземления ИК-1 [Электронный ресурс] // ЭЛНАП: сайт. URL: http://elnap.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=12& Itemid=47 (дата обращения: 03.03.2017).
14. Целебровский Ю. В., Микитинский М. Ш. Измерение сопротивлений заземления опор ВЛ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 48 с.
15. Методические указания по измерению сопротивлений заземления опор ВЛ без отсоединения грозозащитного троса. М.: СПО Союзтехэнерго, 1981. 20 с.
16. Нестеров С. В. Метод расчета заземляющих систем произвольной конфигурации в неоднородных грунтах: автореф. дис. канд. техн. наук / науч. рук. Ю. В. Целебровский; Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2005. 20 с.
17. Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств / А. Н. Новикова, А. Н. Лубков, О. В. Шмараго, Л. И. Галкова, В. Р. Бельцер, О. А. Прохореня, С. И. Кривошеев, А. П. Ненашев, А. А. Парфентьев // Электрические станции. 2007. № 9. С. 53–59.
18. Вольтамперметры селективные для контроля и диагностики заземляющих устройств КДЗ-2. Описание типа средства измерений [Электронный ресурс]. URL: http://pdf.reestrsi.ru/file/35201-07.pdf (дата обращения: 03.03.2017).
19. Ивонин В. В., Данилин А. Н., Куклин Д. В. Экспериментальные исследования высоковольтных импульсных процессов в подземных проводниках // Доклады IV Международной конференции по молниезащите (Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г.). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. С. 141–154.
20. Герасимович Д. А., Дерюгина Е. А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ — Энергетика: междунар. науч.-технич. журн. 2012. № 1. С. 5-8.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович,
ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: 1_i@mail.ru

Баранник Максим Борисович,
научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Селиванов Василий Николаевич,
заместитель директора Центра физико-технических проблем энергетики
Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: selivanov@ien.kolasc.net.ru

Прокопчук Павел Иванович,
научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: prokop@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.374

А. Ф. Усов

ПРИМЕР ИЗ ОПЫТА АНАЛИЗА ЗАРУБЕЖНЫХ ПАТЕНТОВ ПО ТЕМАТИКЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Представлен анализ зарубежного патента в области электроимпульсных способов и средств разрушения горных пород применительно к отбойке фрагментов горной породы от массива. Выявлены и объяснены ошибки авторов в трактовке элементов новизны в предложенном способе. На основе известных положений о физических основах способов разрушения материалов, данных о закономерностях пробоя и разрушения твердых диэлектриков и горных пород дана оценка технико-физических показателей предлагаемого способа фрагментации, показывающая недостижимость заявляемых патентом целей.

Ключевые слова:

высоковольтный импульсный пробой, электроимпульсное разрушение, горные породы, фрагментация, отбойка породы от массива.

A. F. Usov

THE EXAMPLE FROM EXPERIENCE OF ANALYSIS OF FOREIGN PATENTS ON ELECTRIC PULSE DESTRUCTION OF MATERIALS

Abstract

The article gives the analysis of the foreign patent on electric pulse destruction and rock destruction tools in relation to breaking rock morsels from a continuous surface. It reveals and explains the authors' mistakes in interpretation of the proposed method novelty. Based on the well-known provisions of physical bases of materials destruction methods as well as on the data on breakdown mechanism and destruction of solid dielectrics and rocks, we have estimated the technical and physical parameters of the proposed fragmentation method and showed that the method, developed in the patent, is invalid.

Keywords:

high-voltage pulse breakdown, electric pulse destruction, rock breed, fragmentation, rock morsel breaking.

Введение. Способы электроразрядного разрушения материалов с непосредственным электрическим пробоем. Уже приходилось отмечать, что свертывание в России работ по электроимпульсной тематике ставит под угрозу возможности использования созданного российскими учеными багажа научно-технических знаний и ноу-хау в области технологий электроимпульсного разрушения материалов [1]. Исследовательский центр Карлсруэ (FZK), ФРГ, после опробования установок, поставленных НИИ ВН, г. Томск, создал Институт микроволновой техники, и сейчас по лицензиям FZK фирма “Selfrag”, Швейцария, предлагает дезинтеграционные установки различного технологического назначения.

Свидетельством растущего интереса и ожиданий со стороны производства к электроимпульсным технологиям за рубежом является активное патентование разработок. При этом зачастую за новизну принимаются элементы и технические решения, которые давно известны и описаны российскими учеными. Нет уверенности в том, что в условиях, когда в России по финансовым причинам существенно свернут фронт научных и проектно-конструкторских работ по электроимпульсным технологиям, ликвидированы уникальные стенды и расформированы научные коллективы, в мире будут считаться с приоритетом российских разработок, а российское патентное ведомство будет способно дать объективную оценку технической новизны в заявках зарубежных авторов на выдачу им российских патентов. Это будет препятствовать продвижению отечественных научно-технических разработок на внешние рынки, а импорт новой техники в Россию по запатентованным в России зарубежным разработкам приведет к прямому экономическому ущербу для страны, российских перворазработчиков и авторов неопубликованных изобретений.

Принцип зарубежного патентования *I claim* («Я утверждаю») позволяет без достаточного обоснования и проверки «новыми» сформулированными признаками новизны «обходить» патенты конкурентов.

Нам поступило предложение экспериментально подтвердить и оптимизировать под конкретную задачу возможность создания инструмента для отбойки горной породы от массива на принципе патента US 4653697 Method and Apparatus for Fragmenting a Substance by the Discharge of Pulsed Electrical Energy (Inventors: George Codina — Hartsdale, NY; Assignee: CEEE Corporation — Stamford, CT).

Патент предлагает способ фрагментации вещества энергией импульсного электрического разряда через вещество. Ко времени заявления способа (1985 г.) были опубликованы результаты исследований основных известных к настоящему времени способов этого принципа, представленных на рис. 1.

Взаимодействия канала разряда с материалом приводят к его разрушению [1–3], что особо интересно электроаппаратостроению. Природным аналогом разрушения твердых тел/горных пород электрическими разрядами является разрушение естественных объектов природы (скальные выступы горных пород, деревья), строений (печные трубы) разрядами атмосферного электричества. Далее используются термины «твердое тело» при рассмотрении физических аспектов и «горная порода», «руда», «материал» при рассмотрении технологических аспектов. Способ высоковольтного импульсного пробоя, предложенный и описанный А. А. Воробьевым в [4], зарегистрирован в СССР авторскими свидетельствами на изобретения

№ 195408 «Способ разрушения горных пород и полезных ископаемых» (А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская) с приоритетом от 26.06.1951 г. (зарегистрирован 25.02.1967 г.) и № 195403 «Способ отбойки и раздробления полезных ископаемых и горных пород» (А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская) с приоритетом от 28.07.1951 г.

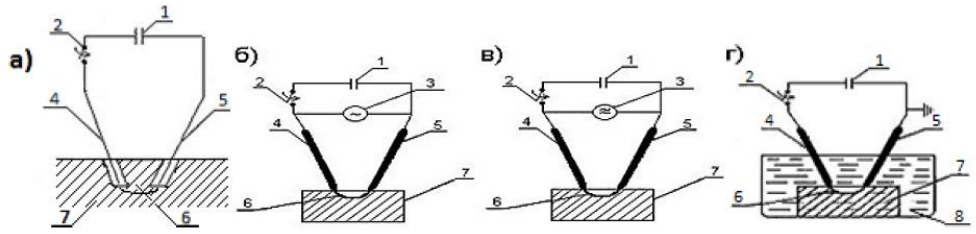


Рис. 1. Принципиальные схемы электроразрядных способов разрушения материалов с электрическим пробоем горной породы:
а — способ высоковольтного импульсного пробоя; *б* — способ электродинамического разрушения; *в* — способ высокочастотного контактного разрушения; *г* — электроимпульсный способ разрушения:
1 — накопитель энергии, источник импульсного напряжения (схемы *а*, *г*);
2 — коммутирующее устройство; *3* — источник электротеплового пробоя;
4, 5 — электроды; *6* — канал разряда; *7* — твердое тело, горная порода;
8 — жидкая среда

Согласно предложению для реализации способа высоковольтного импульсного пробоя электроды располагаются в специально выбуренных шпурах (рис. 1, *а*) так, чтобы путь перекрытия по поверхности был значительно больше разрядного промежутка в твердом теле. Именно в таком варианте впервые в 1953 г. И. И. Каляцкий (Томский политехнический институт) опробовал способ отбойки углей электрическим пробоем с использованием генераторов импульсного напряжения (ГИН) Аркадьева — Маркса. Для пород с низкой электрической прочностью (сланцы, каменные угли) способ можно реализовать и в несколько упрощенном варианте при возможности формирования ступенчатой формы забоя. Однако данному способу присущ принципиально важный недостаток — его недостаточная технологичность. Если рассматривать вариант с предварительным бурением шпуров, то затраты времени и энергии на бурение шпуров не компенсируются энергетическим выигрышем от использования электрических разрядов для разрушения породы. А если рассматривать случай со ступенчатым забоем, то в процессе разрушения массива от импульса к импульсу становится все сложнее сохранять ступенчатую форму забоя, обеспечивать автоматическое нахождение оптимального места установки электродов.

Принцип электротеплового пробоя на переменном напряжении промышленной частоты и напряжении высокой частоты положен в основу способов электродинамического разрушения (рис. 1, *б* [5]) и высокочастотного контактного способа (рис. 1, *в* [6, 7]). В данных случаях в горной породе на высоком переменном напряжении формируется канал электротеплового пробоя с последующим выделением в нем энергии емкостного накопителя. За счет

быстрого нагрева массива полем высокой частоты формирующийся тепловой клин способен создавать в массиве поле механических напряжений, достаточных для разрушения твердого тела, что стало самостоятельным способом разрушения без импульсного источника энергии. Применение способов электродинамического разрушения и высокочастотного контактного способа ограничивается породами с повышенной электропроводностью типа магнетитовых железистых кварцитов.

Основой предложений по усовершенствованию способа высоковольтного импульсного пробоя послужили результаты систематических исследований электрической прочности жидкой и твердой изоляции на импульсном напряжении, закономерностей развития разрядов по границе раздела сред, закономерностей формирования канала разряда и силовых полей в твердом теле, закономерностей прорастания трещин и энергетических характеристик разрушения материала, представленных в [8–19]. Физической основой нового способа, названного электроимпульсным способом разрушения материалов, является научное открытие «Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульсов напряжения» с приоритетом от 14 декабря 1961 г. (авторы А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев и А. Т. Чепиков), зарегистрированное Российской академией естественных наук в 1999 г., диплом № 107, рег. № 122. Новый способ лишен недостатка, свойственного способу высоковольтного импульсного пробоя, он не требует предварительного бурения шпуров, допускает подачу импульсов напряжения с частотой в несколько десятков импульсов в секунду, обеспечивая этим высокую производительность процессов. Монографический цикл обобщающих работ [20–22], раскрывающий физические основы способа и закрепляющий приоритет российских ученых в разработке способа, Российской академией наук отмечен премией имени П. Н. Яблочкова за 2003 г.

С 1960-х гг. разработку способа вели Томский политехнический институт (ныне университет), Кольский филиал АН СССР (ныне Кольский научный центр РАН (КНЦ РАН)), Карагандинский политехнический институт, институт "Механобр" (Санкт-Петербург) и Институт угля СО РАН. Этими работами на принципиально новом физическом принципе созданы научно-технические основы высокопроизводительных, энергетически и технологически эффективных процессов разрушения геоматериалов для горного дела, инженерного строительства, переработки минерального сырья. Разработки апробированы на экспериментальных лабораторных стендах и опытных установках в производственных условиях. Технико-технологические разработки оформлены более чем 500 авторскими свидетельствами на изобретения, в том числе 50 от КНЦ РАН.

Серьезное внимание электроимпульсному способу разрушения за рубежом начато с публикаций и патентов переехавших за рубеж российских исследователей У. Андреса, И. Лисицина и В. Рудашевского.

Характеристика патента US 4653697. В патенте US 4653697 существенная новизна выражается в необходимости и способе предварительного тестирования объекта разрушения, чтобы обосновать оптимальные параметры режима основного энергетического воздействия на объект, обеспечивающего достижение максимальной эффективности процесса фрагментации.

Обычно принято разработку любой технологии начинать с этапа научно-исследовательских работ, изучения физических свойств объекта, выявления основных закономерностей процесса, чтобы обосновать режимы процесса обработки конкретного материала. Создается впечатление, что автор патента преследовал цель вписаться (по-русски – «примазаться») в технологии, чтобы затем дополнительными необоснованными и неподтвержденными признаками ограничить притязания на новизну во взятых за аналог патентах. При этом «новый» признак автор распространяет на широкий спектр принципиально отличающихся технологий импульсного электроразрядного воздействия. Основной пункт патента защищает:

“A method of fragmenting a substance by discharging pulsed electrical energy through the substance comprising the steps of:

(a) contacting the substance with a plurality of electrodes;

(b) discharging a series of measuring pulses into the substance via the electrodes, the measuring pulses having a common voltage amplitude, but different time duration;

(c) measuring the amplitude of the current passing between the electrodes for each measuring pulse;

(d) selecting the measuring pulse having the highest current amplitude as the characteristic pulse duration for fragmenting the substance; and,

(e) discharging at least one fragmenting pulse having an energy level of between 0.5 and 100 KJ into the substance via the electrodes, the fragmenting pulse having a duration approximately equal to the characteristic pulse duration”.

Применение многоэлектродных конструкций в технологиях с импульсным энергетическим воздействием относится ко всем указанным на рис. 1 технологиям.

Введенный в состав установки блок генерирования тестовых импульсов в сочетании с измерением параметров тока и напряжения (поз. *16*, *38*, *42* рис. 2) никаким образом не связаны с определением технико-физических показателей процесса фрагментации и не являются системой контроля над процессом фрагментации.

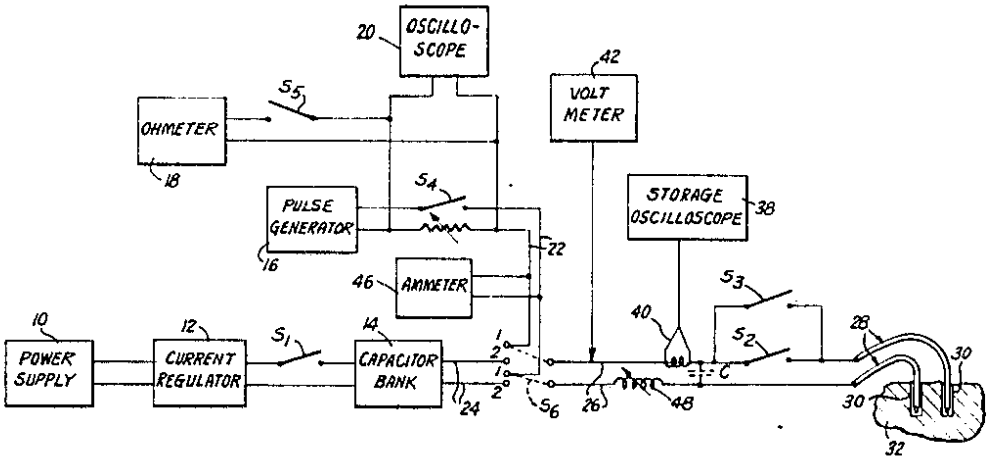


Рис. 2. Принципиальная схема фрагментации материала импульсами электрической энергии согласно патенту US 4653697

Предлагаемая система тестового опробования, ограниченная п. 17 патентной формулы до трех импульсов напряжением 1 кВ и длительностью соответственно 1, 2, и 4 мкс, не выводит на научно обоснованный критерий оптимизации процесса фрагментации. Согласно патенту критерий оптимизации сводится к выбору длительности фрагментирующего импульса, равной длительности тестового импульса, имеющего самую высокую амплитуду тока при разряде импульсного генератора (*16*, рис. 2) на электроды (*30*, рис. 2) в блоке породы, предназначенном для разрушения (*32*, рис. 2). Фрагментирующий импульс в патенте характеризуется только энергетической составляющей — величиной энергии импульса и продолжительностью ее выделения без указания напряжения заряда емкостного накопителя энергии и амплитуды импульса. Кстати, в описании схемы дана безграмотная характеристика “Power Supply” (Power supply 10 may have an output of 100 watts and 120 volts A. C. while current regulator 12 may have a capacity of 5mA). “120 volts A.C.” можно отнести только к переменному напряжению на входе зарядного устройства, а напряжение выхода не указано ни в описании работы схемы, ни в примерах испытания устройства.

Самое главное, в патенте не учитывается физическая сущность процесса электроразрядного фрагментирования, реализуемого в две последовательные стадии — электрический пробой с формированием канала разряда и энерговыделение при разряде емкостного накопителя на канал разряда с созданием в твердом теле импульсных силовых полей, приводящих к разрушению твердого тела.

Если исходить из представления о двух стадиях процесса, то для стадии пробоя горной породы нужно обеспечить получение импульсного напряжения на нагрузке с параметрами, соответствующими критериальным условиям технологии, т. е. гарантирующим максимальную (100 %) вероятность пробоя при минимальных пробивных градиентах (этим обеспечивается пробой промежутка максимальной величины). Это определяется электрофизическими свойствами (электрическая прочность) горной породы и параметрами схемы генерирования импульсов, из которых часть является контролируемыми (разрядная емкость, волновое сопротивление передающей системы), а сопротивление нагрузки определяется свойствами горной породы. Для стадии энерговыделения в канале разряда нужно обеспечить максимальную энергетическую эффективность процесса разрушения, которая в зависимости от требований к технико-технологическим показателям процесса может быть выражена различным соотношением параметров: максимальный объем разрушения за счет максимального прорастания магистральных трещин, максимальное значение образованной новой поверхности и заданный гранулометрический состав продукта разрушения. Это зависит от контролируемых параметров разрядного контура (разрядная емкость, запасаемая энергия, определяемая соотношением $W = \frac{CU^2}{2}$) и физико-механических (прочностных и упругих) свойств горной породы. В этом случае сопротивление канала разряда, от которого зависит коэффициент передачи энергии в канал разряда, определяется совокупностью контролируемых и неконтролируемых свойств системы [21]. Согласовать критерии оптимизации пробоя и энерговыделения в схеме с одним накопителем энергии практически невозможно [20].

Согласно патенту тестовые импульсы напряжения одного уровня напряжения, но различной продолжительности получаются с использованием генератора Маркса. Отметим, что генераторы Маркса применяются для получения импульсов в сотни киловольт, и без применения специальных способов коррекции формы импульсов о регулируемом параметре «длительность импульса» говорить не имеет смысла. Для получения импульса в 1 кВ с формой, близкой к прямоугольной (только в этом случае можно говорить о длительности импульса), следует использовать другие схемы.

Далее, допустим, что тестовая схема гарантирует получение импульсов контролируемой длительности. Но, во-первых, оценка импеданса породы по формуле $Z = U/I$ будет справедлива лишь при подключении регистратора тока непосредственно у электродов. Чтобы по сигналу на входе линии оценить импеданс породы, нужно вести расчет с учетом отражения сигнала от конца линии. Даже если допустим, что импеданс оценивается правильно, то тогда.

1. Не представлено обоснования для ожидания того, что применительно к горным породам при напряжениях импульсов 1 кВ длительность тестовых импульсов будет существенно влиять на величину тока. В столь слабом электрическом поле нет физических причин для проявления нелинейности нагрузки и ток будет одинаков для любой длительности импульса, соответственно, и импеданс породы будет неизменным. К сожалению, в патенте не приведены экспериментально полученные осциллограммы, и декларируемую зависимость тока от длительности тестового импульса напряжения нельзя считать подтвержденной.

2. Принцип предварительного тестирования в предлагаемом электротехническом решении нельзя использовать даже для частной задачи оптимизации параметров генерирования высоковольтных импульсов для первого этапа процесса — электрического пробоя горной породы. Достоверное определение импеданса горной породы, позволяющее в расчетных схемах замещения представить нагрузку совокупностью резистивной и емкостной составляющих, может дать основу для расчета параметров генерируемых импульсов при известных контролируемых параметрах схемы — разрядной емкости, волнового сопротивления передающей линии, а также для оптимизации электрической схемы генерирования импульсов по критерию максимального коэффициента использования схемы (позволяет увеличить длину разрядных промежутков). Примеры решения подобных задач для электроимпульсной технологии в присутствии жидкой среды, в том числе воды, рассмотрены в [23–25] и в развернутом виде в [20]. По анализируемому патенту можно отметить ошибки автора в трактовке электротехнических расчетов. Вряд ли следует усложнять схему введением передающей линии, чтобы решать задачу согласования волнового сопротивления линии и импеданса нагрузки. Импеданс горных пород, если только они не насыщены электролитными растворами, на несколько порядков выше волнового сопротивления системы ограниченной длины токопроводников от генератора к электродам. Предлагаемый патентом способ увеличения волнового сопротивления длинной линии введением сосредоточенной индуктивности невозможен по определению (длинная линия — система с распределенными параметрами). Возможно, что составляющие новизну элементы электротехники в анализируемом патенте заимствованы из патентов по высокочастотному нагреву нефтеносных сланцевых

пластов (один из патентов G. Codina связан с воздействием на нефтеносные пласты с целью повышения нефтеотдачи, и он в курсе этой проблемы). Но там применительно к измерению импеданса пород повышенной электропроводности это может быть оправдано, тем более что энергетические импульсы используются в один прием высокочастотного нагрева, а генераторы импульсов далеко отстоят от электродных систем.

В приведенных в патенте примерах использования способа не указаны параметры накопителя энергии — напряжение и емкость, что не позволяет проверить являются ли данные фактическими, а не вымышленными. Экспериментально неподтвержденными и просто безответственными являются отличительные признаки патента в отношении энергетических параметров фрагментирующих импульсов — до 100 кДж, разрядных промежутков — до 12 дюймов.

Оценка технико-физических характеристик отбойки материала от массива на принципе способа высоковольтного импульсного пробоя. Автор патента US 4653697, возможно, сознательно, чтобы не пугать экспертов и облегчить прохождение заявки на патент, не указывает данные об уровне напряжений, при которых реализуется способ. Это достаточно высокие напряжения — несколько сотен киловольт. Данные об электрической прочности твердых диэлектриков и горных пород и руд приведены в [8, 21–23] и для примера представлены на рис. 3 (рис 1.5 из [20]).

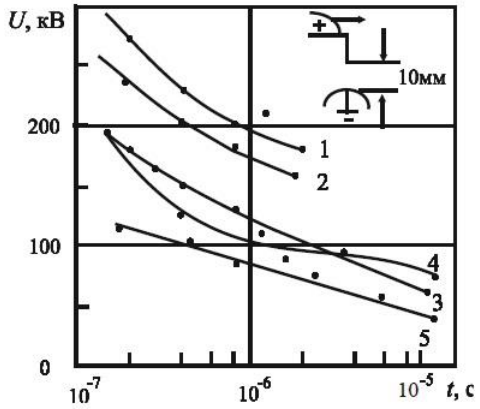


Рис. 3. Вольт-секундные характеристики пробоя горных пород в поле «острие — плоскость» на косоугольных импульсах положительной полярности: *1* — кварцит; *2* — фельзит-порфир; *3* — мрамор; *4* — глинистый сланец; *5* — песчаник

Приведенные выше данные, соответствующие пробою в промежутке 1 см в системе электродов с резко неоднородным полем (острие — плоскость), могут служить исходными для пересчета на разрядные промежутки иной величины. Данные, соответствующие времени 10^{-5} с, близки к минимально возможным значениям прочности на постоянном и переменном напряжении. Для связи пробивного напряжения с параметрами импульса и величиной разрядного промежутка в системе электродов с резко неоднородным полем (острие — плоскость) можно воспользоваться эмпирическими соотношениями, приведенными в [21]. Экспериментальные данные для подобных условий представлены на рис. 4 (рис 2.7 в [21]).

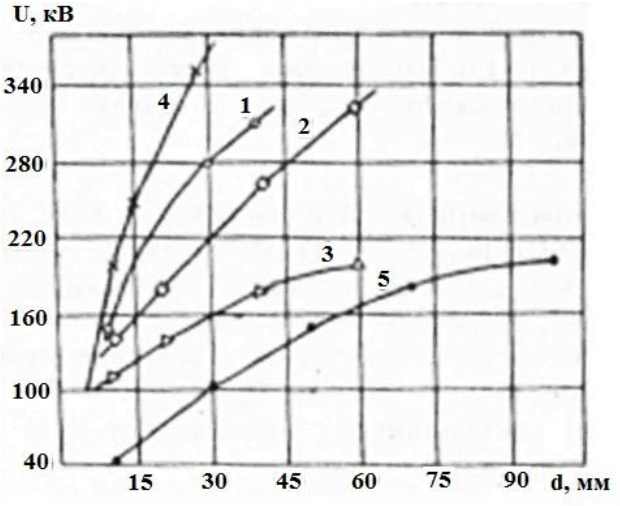


Рис. 4. Зависимость электрической прочности горных пород от величины разрядного промежутка:
1 — мрамор; *2* — сланец; *3* — песчаник; *4* — лед; *5* — уголь

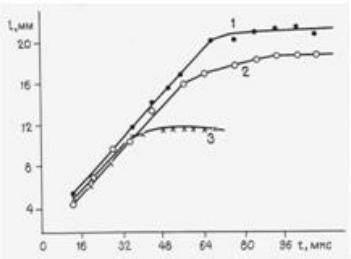
В системе острийных/стержневых электродов (при меньшей степени неоднородности поля) значения напряжения пробоя будут несколько выше. На импульсах прямоугольной формы значения напряжения пробоя несколько (10–15%) ниже.

Таким образом, с ориентировкой на разумный уровень импульсных напряжений в 200–300 кВ можно предполагать, что разрядные промежутки в электродной системе для отбойки породы от массива способом высоковольтного импульсного пробоя будут не более 40–50 мм.

В технологиях высоковольтного импульсного пробоя большое значение имеет фактор разгрузки канала разряда, обусловленный истечением плазмы через устья канала разряда в области электродов и через растущие и выходящие на свободную поверхность трещины [10]. При возникновении этих условий давление в плазме канала разряда резко снижается, соответственно, снижаются параметры генерируемых в твердом теле силовых полей и в конечном итоге эффективность разрушения. Степень разгрузки наиболее выражена, если окружающей средой будет воздух.

В приведенных на рис. 5 данных изменение условий разгрузки осуществлялось герметизацией острийных электродов эпоксидным компаундом. В опыте регистрировались время роста трещин, максимальная длина магистральных трещин, суммарная длина видимых трещин, площадь трещинообразования (ограничена по вершинам магистральных трещин).

За критическое значение времени разгрузки может быть принято отношение половины длины канала пробоя к скорости распространения волны в плазме [9, 11]. Именно за этот промежуток времени энергия накопителя должна быть выделена в канале разряда, и это является критерием оптимизации на второй стадии процесса электроразрядного разрушения с электрическим пробоем твердого тела.



УСЛОВИЯ / ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ	а)	б)	в)
ВРЕМЯ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ, МК СЕК	36	56	68
ПЛОЩАДЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ, $мм^2$	330	615.5	1052
СУММАРНАЯ ДЛИНА ВИДИМЫХ ТРЕЩИН, ММ	58.8	81	228
МАКСИМАЛЬНАЯ ДЛИНА ТРЕЩИН, ММ	8	14	21

Рис. 5. Показатели трещинообразования при сквозном пробое оргстекла с различной степенью герметизации электродов:
1, в — герметизированы оба электрода; *2, б* — герметизирован один электрод; *3, а* — без герметизации

Глубина погружения электродов в шпуры предопределяет потенциальный объем воронки откола материала от массива. Применительно к электроимпульсному способу разрушения (рис. 1, *г*) предложены эмпирические выражения связи объема разрушения с величиной разрядного промежутка (половина эллипсоида, оси которого функционально связаны с величиной разрядного промежутка). Для способа высоковольтного электрического пробоя (рис. 1, *а*) соотношения неизвестны, но, видимо, можно воспользоваться аналогичными данными из литературы по взрывным способам разрушения материала. Но, определенно, чем меньше глубина погружения, тем меньше будет объем разрушения. В откольную воронку, по аналогии с электроимпульсным способом, будет вовлечена лишь незначительная доля материала ниже канала пробоя — материал зоны смятия (рис. 6).

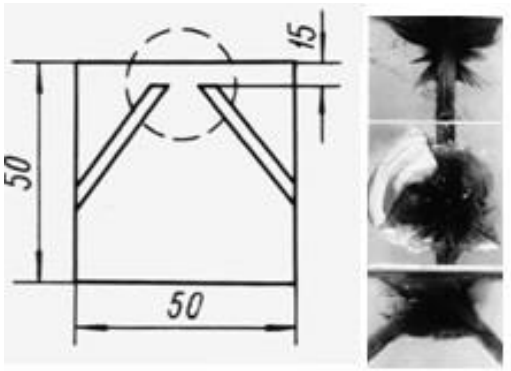


Рис. 6. Формирование откольной воронки при электрическом разряде в оргстекле под поверхностностью образца (схема и картина разрушения в трех ракурсах, в центре вид сверху)

В приближенных оценках объема разрушения можно воспользоваться данными электроимпульсного разрушения железобетонных строительных панелей (глава 4.6 в [22]). В данном варианте разрушения одним из электродов является арматура панели, а высоковольтный стержневой электрод перемещается по поверхности панели. Процесс осуществляется в ванне с водой, чтобы избежать перекрытия с высоковольтного электрода на обнажающуюся арматуру. В наиболее простом случае панелей с однослойной арматурой при энергии

импульсов в 19 кДж и рабочем напряжении 420 кВ производительность одного разряда составляет порядка 2.5 дм^3, а энергоемкость 2 кВтч/м^3. Для технологий на основе высоковольтного импульсного пробоя производительность будет, соответственно, ниже в силу того, что будут меньше разрядные промежутки для обеспечения принципа координации пробивных напряжений сквозного пробоя породы и разряда перекрытия по поверхности и будет более выраженным снижение эффективности разрушения за счет разгрузки канала разряда при реализации процесса в воздушной окружающей среде.

При обосновании оптимальной глубины погружения электродов в шпуры должно быть учтено два условия. Глубина погружения электродов ($h_{\min}$) должна быть достаточной, чтобы выполнялось условие принципа координации электрических прочностей в параллельной системе сред — превышение напряжения перекрытия по поверхности горной породы над напряжением сквозного пробоя горной породы в области торцевых окончаний электродов. С другой стороны, глубина погружения электродов ($h_{\max}$) не должна быть более того уровня, при котором распространяющиеся от канала разряда трещины достигают свободной поверхности за время выделения энергии до момента разгрузки канала пробоя. Оба этих значения могут быть оценены по значениям скоростей развития разрядных процессов в горной породе, по поверхности горной породы и по распространению магистральных трещин в горной породе.

Выводы

По оценке условий реализации разрушения горных пород высоковольтным импульсным пробоем метод, описанный в обсуждаемом патенте, не имеет перспектив производственного использования в горном деле и горнотехническом строительстве. Вопрос со способом разрушения горных пород высоковольтным импульсным пробоем для промышленной электротехнологии закрыт в 1953 г., и пока не предъявлено специфических задач, чтобы возвращаться к нему.

С большей эффективностью и меньшими техническими проблемами задачи горного дела и горнотехнического строительства, например строительства туннелей и подземных горных выработок, могут решаться с использованием электроимпульсного способа разрушения материалов. Для отбойки породы от массива можно использовать средства электроимпульсного бурения (проходка пилотной скважины) и резания горных пород (подрезание, вырезка блоков, проходка оконтуривающих щелей).

Вместе с тем такой вывод не закрывает путь поиска возможностей использования импульсного электрического пробоя для решения отдельных специфичных задач в научных исследованиях и технологиях. Импульсные электрические разряды могут выступать инструментом физических исследований в изучении высокоинтенсивных динамических воздействий на вещество. Экстремальные условия в космосе определяют ту специфичность, которая может оправдать поиск новых вариантов описанных способов электроразрядного разрушения и способов электроразрядного разупрочнения материалов [26–28], особо не связанных с требованиями высокой производительности и энергетической эффективности.

Литература

1. Воробьев А. А., Завадовская Е. К. Электрическая прочность твердых диэлектриков. М., 1956. 312 с.
2. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
3. Воробьев А. А. Нарушение электрической прочности диэлектриков и их пробой. Томск, 1962. 108 с.
4. Воробьев А. А. Электрические разряды обрабатывают материалы, разрушают твердые тела // Изв. Томск. политехн. ин-та. 1958. Т. 95. С. 315–339.
5. Ржевский В. В., Протасов Ю. И. Электрическое разрушение горных пород. М.: Недра, 1972. 208 с.
6. Высокочастотный контактный способ вторичного дробления / В. С. Кравченко и др. // Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского. М.: Госгортехиздат, 1960. № 1.
7. Арш Э. И. Применение токов высокой частоты в горном деле. М.: Недра, 1967. 312 с.
8. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Е. К. Завадовская и др. Томск: Изд. Томского ун-та, 1971. 225 с.
9. Трещинообразование в твердом теле при динамическом нагружении / А. Ф. Усов, Б. С. Блазнин, А. А. Кожушко, В. А. Лагунов, И. А. Щеголев // Физика процессов, техника и технология разработки недр. М.: Недра, 1970. С. 55–59.
10. Экспериментальные исследования импульсного электрического разряда как источника динамического нагружения / Б. С. Блазнин, А. Ф. Усов, С. С Локшина, А. А. Хрущинский, М. М. Каган // Термомеханические методы разрушения горных пород. Киев: Наукова думка, 1972. Ч. 5. С. 104–107.
11. Разрушающие факторы при воздействии на твердое тело искрового разряда / Б. С. Блазнин, А. А. Кожушко, В. А. Лагунов, А. Ф. Усов // Исследование действия взрыва при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Апатиты: КФАН СССР, 1973. С. 166–171.
12. Семкин Б. В. Электрическая искра в твердом теле как источник механических возмущений среды // Техника высоких напряжений. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973. С. 22–23.
13. Тонконогов М. П. Диэлектрическая релаксация, электрический пробой и разрушение горных пород. М.: Недра, 1975. 175 с.
14. Казуб В. Т., Коршунов Г. С., Чепиков А. Т. О процессе формирования разряда в системе электродов, расположенных на границе раздела жидкого и твердого диэлектриков // Изв. вузов. Физика. 1978. № 9. С. 61–66.
15. Электрический разряд на границе раздела жидкого и твердого диэлектриков / В. Т. Казуб и др. / Физика диэлектриков и новые области их применения: тез. докл. всесоюз. конф. (Караганда, 8–10 июня 1978 г.). Караганда: Изд. Караганд. политехн. ин-та, 1978. С. 26–27.
16. Основы электроимпульсной дезинтеграции и перспективы применения ее в промышленности / И. И. Каляцкий, В. И. Курец, Г. А. Финкельштейн, В. А. Цукерман // Обогащение руд. 1980. № 2. С. 6–11.
17. Семкин Б. В., Курец В. И., Финкельштейн Г. А. Энергетические аспекты электроимпульсной дезинтеграции твердых тел // Обогащение руд. 1980. № 3. С. 5–8.

18. Семкин Б. В. Электрический взрыв в конденсированных средах. Томск: Изд. Томского политехн. ин-та, 1979. 89 с.
19. Обработка природного камня электрическими разрядами / Б. С. Блазнин, И. А. Щеголев, Л. И. Лозин и др. // Электрон. обраб. материалов. 1983. № 1. С. 5–7.
20. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. 179 с.; изд. 2-е. Барнаул: АГТУ, 2000. 160 с.
21. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 276 с.
22. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
23. Усов А. Ф. Об особенностях использования импульсного пробоя при сверхвысоких напряжениях // Изв. Томск. политехн. ин-та. 1965. Т. 139. С. 88–96.
24. Усов А. Ф. К методике выбора компенсирующей емкости в схеме обострения фронта высоковольтных импульсов // Изв. Томск. политехн. ин-та. 1966. Т. 152. С. 24–31.
25. Усов А. Ф., Каляцкий И. И. К методике выбора элементов схемы обострения фронта высоковольтных импульсов // Изв. Томск. политехн. ин-та. 1968. Т. 159. С. 82–90.
26. Усов А. Ф., Ракаев А. И. Электроимпульсное дробление и разупрочнение руд и материалов // Обогащение руд. 1989. № 4. С. 42–43.
27. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями / Ю. А. Котов, Г. А. Месяц, А. Л. Филатов и др. // ДАН. 2000. Т. 372, № 5. С. 654–656.
28. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В. А. Чантурия, Ю. В. Гуляев, В. Д. Лунин и др. // ДАН. 1999. Т. 366, № 5. С. 680–683.

Сведения об авторе

Усов Анатолий Федорович,
старший научный сотрудник лаборатории высоковольтной электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14
Эл. почта: usov@admksc.apatity.ru, http://www.kolasc.net.ru/spark

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УДК 621.311

В. Н. Селиванов, М. Б. Баранник, В. А. Билин, Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, Я. А.Сахаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА В НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРА В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация

Приведены результаты анализа данных непрерывного мониторинга геоиндуктированных токов в нейтралях трансформаторов, установленных на подстанциях магистральной электрической сети «Северный транзит». Из-за намагничивания магнитопровода трансформатора квазипостоянным током изменяется относительное содержание гармоник в фазных токах и токе нейтрали. Предварительный анализ демонстрирует нелинейный характер исследуемого явления и его зависимость от конструкции трансформатора.

Ключевые слова:

геоиндуктированный ток, электрические сети, трансформатор, гармоники.

V. N. Selivanov, M. B. Barannik, V. A. Bilin, B. V. Efimov, V. V. Kolobov, Ya. A. Sakharov

ANALYSIS OF FREQUENCY RESPONSE OF NEUTRAL CURRENT IN TRANSFORMER UNDER GEOMAGNETIC DISTURBANCE

Abstract

The article presents data analysis results of the continuous monitoring of geomagnetically induced currents in the neutrals of transformers installed at substations of the "Northern Transit" transmission lines. The magnetization of the magnetic circuit of a transformer by the quasi-constant current leads to change in the relative content of the harmonics in the phase and neutral currents. The preliminary analysis has demonstrated the nonlinear nature of the phenomenon and its dependence on transformer design.

Keywords:

geomagnetically induced current, transmission grid, transformer, harmonic frequency.

Во время геомагнитных бурь (ГМБ) в разнесенных точках на поверхности Земли наводятся разности потенциалов, обусловленные геоэлектрическим полем. Геоиндуктированный ток (ГИТ) возникает, когда две удаленные точки соединяются проводником. В случае электрической сети роль проводника играет многопроводная линия электропередачи, которая соединена с землей через выводы обмоток трансформаторов, нейтрали которых заземлены на подстанциях. При характерной частоте от 0.001 до 0.1 Гц амплитуда ГИТ может достигать 300 ампер. При протекании такого квазипостоянного тока в протяженной электрической сети с глухозаземленной нейтралью кривая намагничивания трансформаторов может сместиться, что приведет к полупериодному насыщению их сердечников и увеличению содержания высших гармоник в фазных токах [1].

Центр физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН совместно с Полярным геофизическим институтом (ПГИ) проводит работы по исследованию влияния ГМБ на состояние энергетических сетей и трансформаторных подстанций на Кольском полуострове и в Карелии с использованием разработанной региональной системы мониторинга ГИТ [2]. Для исследования выбраны подстанции в Кондопоге, Лоухах, Апатитах

и Мурманске на магистральной линии 330 кВ и подстанция в пос. Ревда на линии 110 кВ. Такой выбор точек измерения позволяет при развитии магнитосферного возмущения исследовать распределение ГИТ по широте на магистральной линии, ориентированной с юга на север, а также регистрировать ГИТ в линии, направленной с запада на восток.

Система мониторинга позволяет проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтралях трансформаторов, а также контролировать содержание гармоник в сети. Записываются следующие составляющие полного тока в нейтрали, полученные разложением в ряд Фурье с интегрированием на временном интервале 0.1 с:

- постоянная составляющая, несущая информацию непосредственно о ГИТ; содержит также сигнал смещения нуля датчика тока, обусловленного остаточной индукцией в магнитопроводе и температурным дрейфом;
- амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоники, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ значительной амплитуды. В нормальном режиме токи второй и третьей гармоники пренебрежимо малы, поэтому можно считать, что их рост обусловлен только искажением из-за замагничивания магнитопровода ГИТ. Ток первой гармоники и в рабочем режиме может достигать ощутимых значений за счет различных несимметрий в энергосистеме и трансформаторе.

Кроме того, регистрируются мгновенные значения токов, протекающих в нейтралях при различного рода переходных процессах, например коммутациях, коротких замыканиях или грозовых воздействиях [3]. Кривая тока строится по 256 точкам при частоте дискретизации 14400 Гц, т. е. можно получить сигнал длительностью 18 мс (почти период промышленной частоты). Блок записи мгновенных значений срабатывает по условию превышения некоторого порогового значения производной от тока нейтрали в данный момент времени.

С 2011 г. система мониторинга зарегистрировала порядка 100 запусков блока записи мгновенных значений, обусловленных воздействием ГИТ, причем все события произошли на подстанции в Лоухах. Эта подстанция введена в строй в 2009 г. и на ней установлены два автотрансформатора мощностью 125 МВА производства фирмы “Areva Enerji Endustrisi” (Турция). На вводимых в последние годы подстанциях зачастую устанавливают автотрансформаторы импортного производства, при проектировании которых одним из основных критериев является экономическая целесообразность. Магнитопроводы таких трансформаторов спроектированы для работы в предельных режимах, когда рабочая точка находится вблизи точки насыщения.

Примеры регистрации мгновенных значений тока в нейтрали трансформатора в Лоухах и его спектр представлены на рис. 1 и 2. Уже из приведенных иллюстраций видно, что гармоники тока нейтрали растут непропорционально с ростом ГИТ. При больших значениях ГИТ магнитопровод трансформатора намагничивается, что приводит к резкому росту 6-й, четной, гармоники нулевой последовательности.

По результатам обработки порядка 40 кривых тока в нейтрали были построены зависимости токов гармоник от ГИТ, показанные на рис. 3. Использовались только регистрации при ГИТ от 20 до 60 А. При меньших токах значительную погрешность вносят сигналы смещения первичного датчика (температурный дрейф, остаточное намагничивание магнитопровода клещей). Эту погрешность практически невозможно устранить, так как она лежит в том же частотном диапазоне, что и ГИТ.

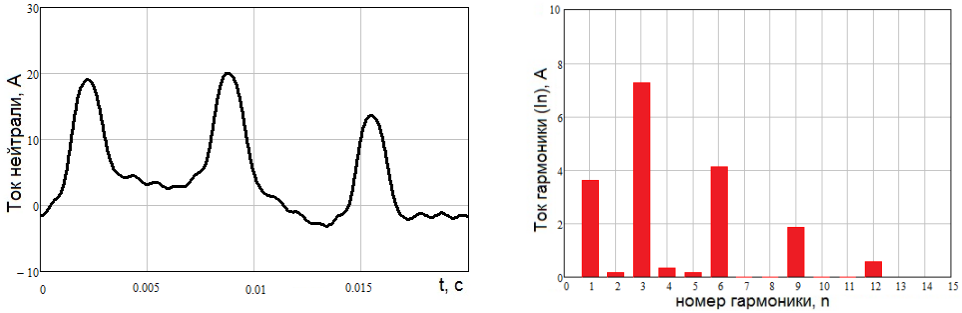


Рис. 1. Кривая и спектр тока в нейтрали автотрансформатора на подстанции Лоухи при ГИТ = 4.5 А

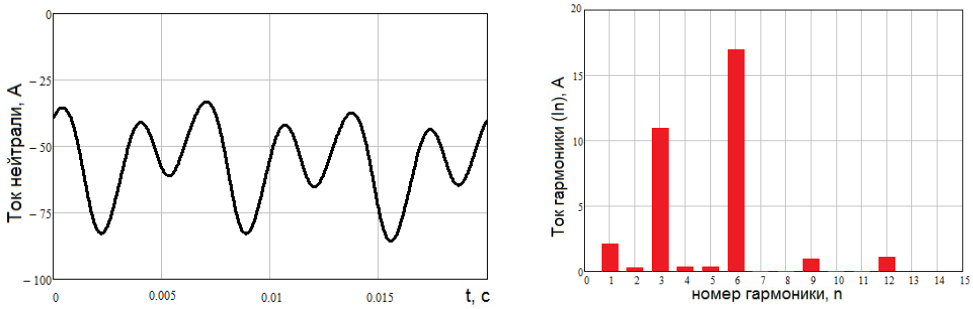


Рис. 2. Кривая и спектр тока в нейтрали автотрансформатора на подстанции Лоухи при ГИТ = 56 А

В идеально симметричной трехфазной схеме в токе нейтрали должны отсутствовать гармоники прямой (гармоники с номерами 3*k*-2, где *k* изменяется от 1 до бесконечности) и обратной последовательностей (3*k*-1). Гармоники нулевой последовательности (3*k*) синфазны, поэтому ток нейтрали равен утроенному значению фазных токов.

Кроме того, если вольт-амперные характеристики всех элементов схемы являются симметричными, то в токе нейтрали должны отсутствовать также четные гармоники. Появление таких гармоник в токе нейтрали означает, что ВАХ трансформатора сместилась в результате намагничивания магнитопровода квазипостоянным током.

Реальные трехфазные электрические сети не являются симметричными. Бывают несимметрии фазных напряжений и нагрузок (токов), а также несимметрии магнитных потоков в магнитопроводах трансформаторов. Именно поэтому в нейтрали всегда присутствует ток первой гармоники, значение которого меняется в зависимости от режима работы автотрансформатора и его нагрузки [4].

Как видно из приведенных зависимостей, ток первой гармоники не зависит от ГИТ, токи 3-й и 6-й гармоник растут линейно, т. е. их относительное содержание в токе нейтрали остается неизменным в данном диапазоне изменения ГИТ. Поведение девятой гармоники требует изучения, так как и абсолютное, и относительное содержание её в токе нейтрали с ростом тока намагничивания снижается, причем по степенному закону с показателем порядка от 2 до 5. Как показывают предварительные исследования, такой эффект объясняется резонансно-волновыми явлениями в линиях электропередачи 330 кВ, питающих подстанцию Лоухи. Резонансный колебательный контур включает нелинейно зависящую от тока индуктивность трансформатора и две воздушные линии

с распределенными параметрами длиной порядка 100 км каждая. При определенных соотношениях длины воздушной линии и частоты гармоники, а также в зависимости от величины намагничивания трансформатора квазипостоянным током, в линии возможно возникновение разного рода резонансов токов и напряжений, которые приводят к относительному «усилению» или «ослаблению» отдельных гармоник [5].

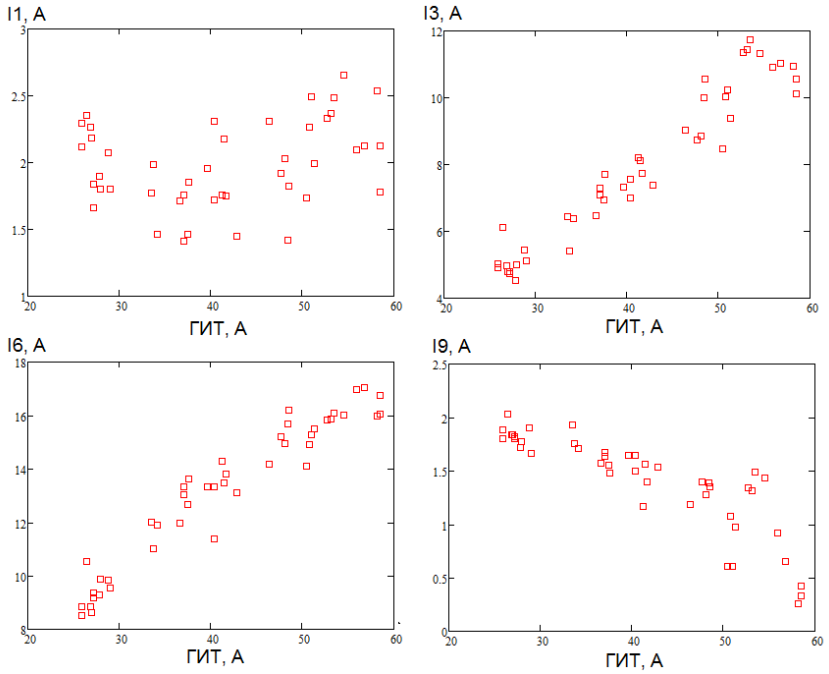


Рис. 3. Зависимости амплитуд токов гармоник в нейтрали автотрансформатора на подстанции Лоухи от величины ГИТ

Зависимости содержания гармоник от ГИТ можно также построить с использованием регистраций амплитудных значений ГИТ, токов первой, второй и третьей гармоники, причем это можно сделать и для тех подстанций, где не было запусков блока записи мгновенных значений или такого блока нет вообще (Выходной, Ревда, Титан, Кондопога).

Для подстанции Лоухи выбран день с наибольшим зарегистрированным там током — 8 сентября 2015 г. На рис. 4 показаны кривые ГИТ и амплитуд гармоник в момент максимального возмущения геомагнитного поля.

Заметим, что при ГИТ, превышающем 40 А, операционный усилитель измерительных клещей входит в режим ограничения сигнала (клиппирование), поэтому данные, соответствующие этому диапазону, исключаются из анализа. Нужно всегда помнить, что клиппируется сигнал полного тока (возникает перегрузка операционных усилителей по уровню входного сигнала, ограниченного уровнем напряжения питания). Порог ограничения конкретных гармоник зависит от их относительного содержания в полном токе.

На рисунке 5 показаны построенные по этим кривым за выбранный период времени зависимости гармоник от величины ГИТ (серым выделена зона клиппирования входного сигнала). Ток первой гармоники не зависит от величины постоянного тока намагничивания, ток второй гармоники показывает слабый рост с ростом величины ГИТ, а ток третьей гармоники в диапазоне 20–40 А линейно растёт с ростом ГИТ.

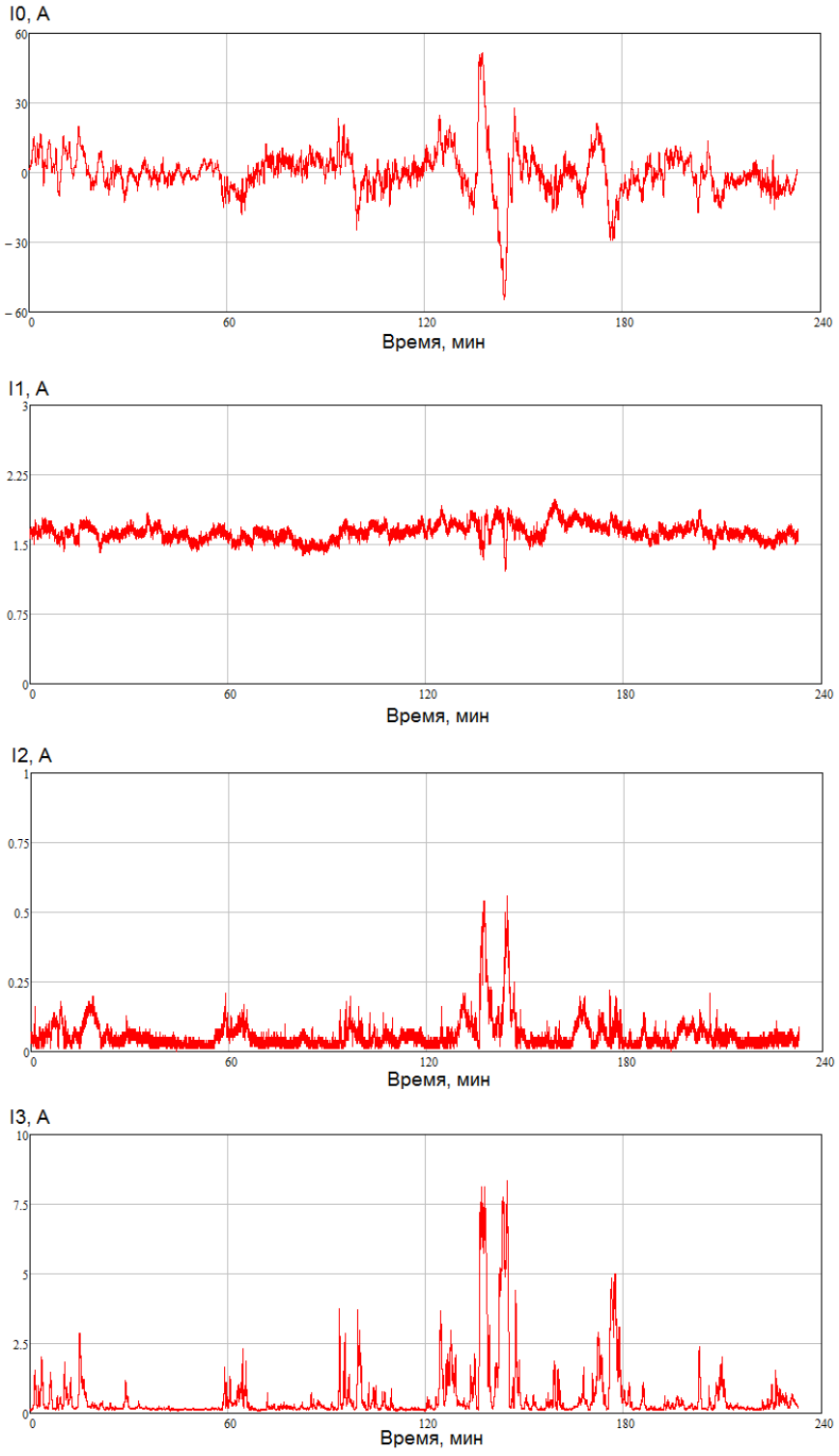


Рис. 4. Кривые амплитуд ГИТ и токов гармоник в нейтрали трансформатора на подстанции Лоухи

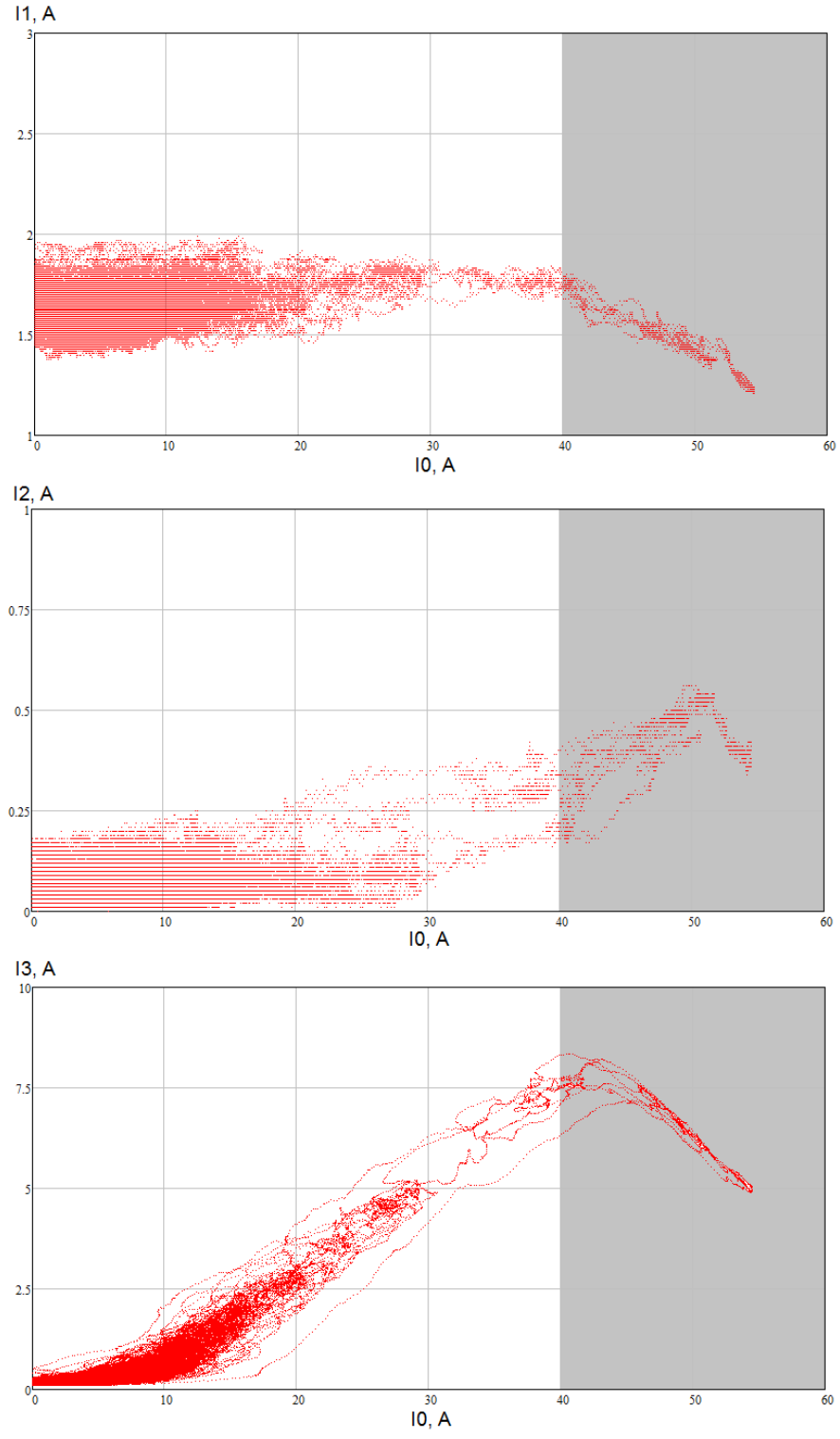


Рис. 5. Зависимости амплитуд токов гармоник в нейтрали автотрансформатора на подстанции Лоухи от величины ГИТ

Аналогичные зависимости на рис. 6 и 7 были построены для автотрансформатора на подстанции Выходной. В качестве примера выбрана дата 29 июня 2013 г., когда во время мощной ГМБ ток в нейтрали автотрансформатора также превысил диапазон измерительных клещей. На этой подстанции диапазон измерения клещей шире, чем в Лоухах, ограничение наступает при полном токе 125 А.

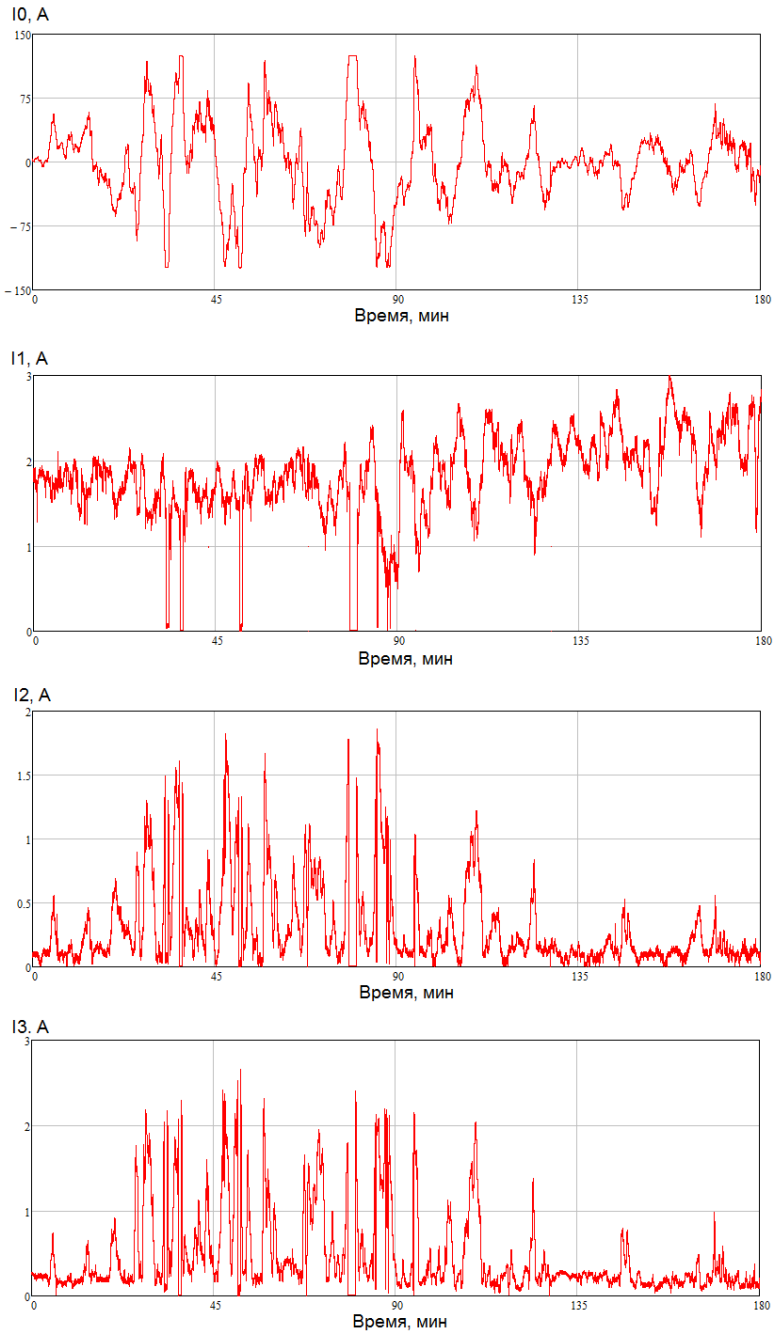


Рис. 6. Кривые амплитуд ГИТ и токов гармоник в нейтрали трансформатора на подстанции Выходной

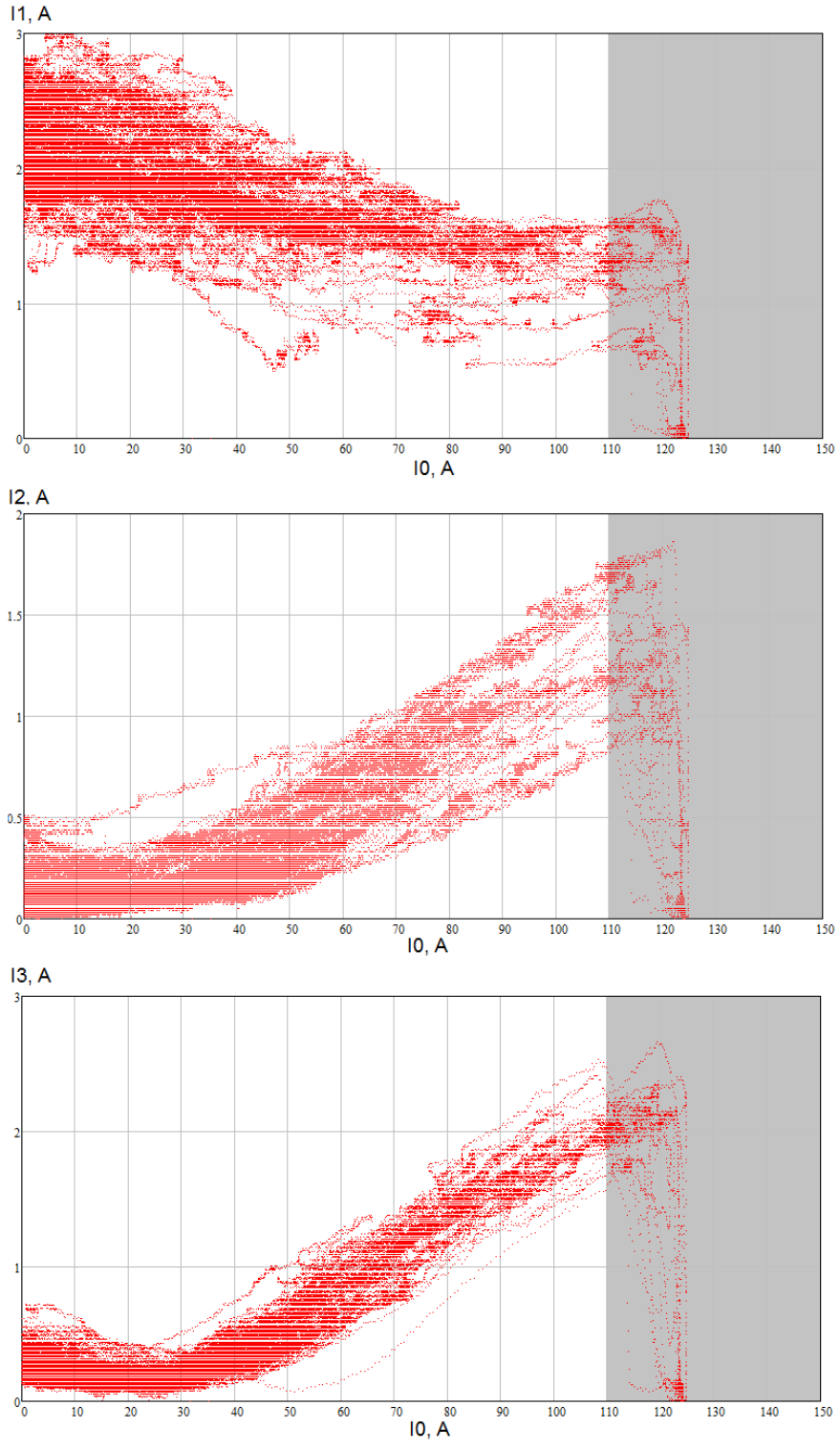


Рис. 7. Зависимости амплитуд токов гармоник в нейтрали автотрансформатора на подстанции Выходной от величины ГИТ

По зависимости $I1$ от $I0$ на рис. 7 создается впечатление, что ток первой гармоники падает с ростом ГИТ, но это, скорее всего, связано с совпавшим по времени изменением распределения нагрузки в сети (требует дальнейшего изучения).

Ток $I2$ растёт с ростом ГИТ, а $I3$ показывает немонотонную зависимость с минимумом при ГИТ порядка 25 А. Сам ток третьей гармоники на порядок меньше, чем в Лоухах, а уровень второй гармоники такой же, как в Лоухах при одинаковых ГИТ.

Выводы

В периоды сильных геомагнитных возмущений ГИТ через нейтрали подстанции Лоухи достигает значений 50 А, при этом содержание третьей гармоники в токе нейтрали повышается в десятки раз. В то же время на подстанции Выходной, где установлен автотрансформатор типа АТДЦТН мощностью 250 МВА, при ГИТ порядка 100 А содержание третьей гармоники в токе нейтрали изменяется только в пять раз. Таким образом, можно констатировать более быстрое и глубокое насыщение трансформатора на подстанции Лоухи. Это, вероятно, объясняется большим количеством железа в магнитопроводе автотрансформаторов отечественного производства, т. е. их рабочая точка находится гораздо дальше от колена кривой намагничивания.

В ходе исследований влияния токов в нейтрали на насыщение магнитопровода трансформатора выявлено неоднозначное поведение высших гармоник, причем возможно даже падение амплитуды тока гармоники с ростом величины ГИТ. Такое поведение гармоник нуждается в дальнейших исследованиях физики процесса насыщения магнитопроводов силовых трансформаторов, которые помогут понять, какое возможное вторичное влияние ГИТ способны оказать на автоматику и релейную защиту силовых трансформаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-48-510199 р_север_а).

Литература

1. Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова // Новости электротехники. 2013. № 2 (80). С. 30–33.
2. Система регистрации геоиндуктированных токов в нейтралях силовых автотрансформаторов / М. Б. Баранник, А. Н. Данилин, Ю. В. Катькалов, Б. Б. Колобов, Я. А. Сахаров, В. Н. Селиванов // ПТЭ. 2012. № 1. С. 118–123.
3. Результаты длительных регистраций токов в нейтралях силовых трансформаторов / В. Н. Селиванов, А. Н. Данилин, В. В. Колобов, Я. А. Сахаров, М. Б. Баранник // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2010. Вып. 1. С. 84–91.
4. Пузаков А. А., Селиванов В. Н., Колобов В. В. Исследование влияния несимметрии нагрузки на ток в нейтрали автотрансформатора // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. № 8 (34), вып. 11. С. 21–29.
5. Исследование частотных характеристик взаимного влияния воздушных линий электропередачи / В. Н. Селиванов, А. Н. Данилин, О. В. Залесова, В. В. Колобов // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 4. С. 96–106.

Сведения об авторах

Селиванов Василий Николаевич,
заместитель директора Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: selivanov@ien.kolasc.net.ru

Баранник Максим Борисович,
научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Билин Владислав Андреевич,
лаборант лаборатории геофизических наблюдений Полярного геофизического института
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 26А
Эл. почта: bilinvlad@gmail.com

Ефимов Борис Васильевич,
директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, д. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: efimov@ien.kolasc.net.ru

Колобов Виталий Валентинович
ведущий научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: 1_i@mail.ru

Сахаров Ярослав Алексеевич,
заведующий лабораторией геофизических наблюдений Полярного геофизического института, к. ф.-м. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 26А
Эл. почта: sakharov@pgia.ru

УДК 621.311

О. В. Залесова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТЯГОВЫХ ТОКОВ

Аннотация

Статья посвящена экспериментальному исследованию спектрального состава тяговых токов. Выполнен анализ изменения спектра тока электровоза при появлении дополнительной нагрузки в одной межподстанционной зоне.

Ключевые слова:
электрифицированная железная дорога, тяговый ток, гармонический состав.

O. V. Zalesova

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TRACTION CURRENTS HARMONIC COMPOSITION

Abstract

The article is devoted to experimental research of current frequency spectrum of traction currents. We made the analysis of electric locomotive currents spectrum change when the additional load in the zone among substations appeared.

Keywords:

electric railway, traction currents, harmonic composition.

Наведенное напряжение на отключенных воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП), обусловленное электромагнитным влиянием контактной сети железной дороги переменного тока, в значительной степени зависит от частоты тока, протекающего в ней. Поэтому для оценки опасного влияния, возникающего во время ремонтных работ на линии, необходимо исследовать спектральный состав тока, нагружающего контактную сеть.

Спектр тока тяговой сети подвержен непрерывным изменениям, вызванным работой выпрямительных электровозов. Анализ осциллограмм первичного тока электровоза при двух и трех нагрузках на одной межподстанционной зоне, выполненный в [1], показал, что амплитудный спектр тока каждого электровоза зависит, главным образом, от его нагрузки и не зависит от режимов работы соседних электровозов. Однако, как показали наши исследования [2] и исследования в [1], амплитуды гармоник тока тяговой сети, питающей два электровоза, оказались ниже (в нашем случае в 1.4–1.6 раза) соответствующих гармоник при одном электровозе в зоне питания и том же токе.

Исследования тока в тяговой сети, электрифицированной на переменном токе, выполненные сотрудниками Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН ранее в 2008 г. [2], из-за недостатка экспериментальных данных нельзя считать объективными. Поэтому с целью получения более общих данных был проведен новый мониторинг тока в тяговой сети на том же участке межподстанционной зоны Апатиты — Оленегорск (рис. 1).

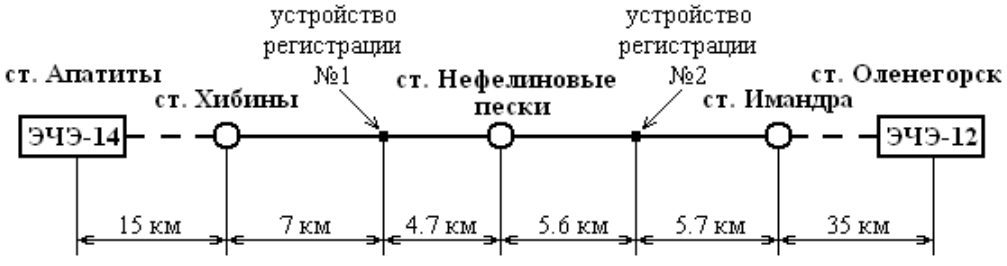


Рис. 1. План расположения устройств регистрации тока в тяговой сети на участке железной дороги Апатиты — Оленегорск

Выбор данного участка межподстанционной зоны протяженностью 73 км был определен исходя из того, что, во-первых, он является однопутным, во-вторых, достаточно удален от питающих его подстанций ЭЧЭ-12 и ЭЧЭ-14, что позволило получить наиболее достоверные данные тяговых токов в рельсовой сети.

Мониторинг токов в рельсовой сети проводился синхронно двумя устройствами регистрации, расположенными на участке между станциями Хибины и Имандра (рис. 1). Для измерения тока использовались токовые клещи специальной конструкции типа АТК-2011, которые подключались к шине, соединяющей средние выводы дроссель-трансформаторов смежных рельсовых цепей (рис. 2) [3]. Сигнал с них по изолированному кабелю передавался на приемное устройство цифрового регистратора (ПК), установленного вблизи полотна на расстоянии 20 м, и производилась непрерывная цифровая запись тока в рельсе.

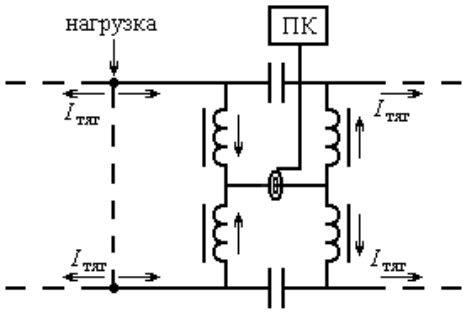


Рис. 2. Схема установки устройства регистрации тока в рельсах

За счёт того, что часть обратного тока стекает с рельсов и возвращается на тяговые подстанции через землю, регистрируемые величины тока значительно меньше, и только при непосредственном прохождении электроподвижного состава (ЭПС) над датчиком и вблизи него величина тока соответствует той, которая была бы при протекании всего обратного тока в рельсе [4]. В зависимости от направления движения ЭПС составляющие обратных тяговых токов определялись из полученных осциллограмм следующим образом:

- «апатитский» ток $I_{ап}$ — ток, регистрируемый УР после прохождения датчика, если состав движется на север, или до прохождения датчика, если состав движется на юг;
- «оленегорский» ток $I_{ол}$ — ток, регистрируемый УР до прохождения датчика, если состав движется на север, или после прохождения датчика, если поезд движется на юг.

На рисунке 3 приведен пример, где четко обозначена граница раздела этих токов. Здесь представлен фрагмент осциллограммы, полученной в момент прохождения электровозом устройства регистрации № 2. Поскольку он находился ближе к ЭЧЭ-14, соответственно, большая часть тока (составляющая $I_{ап}$) поступала к нему от этой подстанции.

В исследовании проводилось сравнение составляющих полных токов, потребляемых ЭПС с каждой из питающих подстанций. Всего было получено двадцать экспериментов. Действующие значения сравниваемых токов определялись в диапазоне 40–75 А.

Таким образом, для исследования были выявлены амплитудные спектры электровозов для двух случаев: когда на участке железной дороги проходил один и два ЭПС. Сравнение спектров тягового тока проводились по данным, полученным с устройства регистрации № 2. Ток второго электровоза на участке регистрировался устройством № 1, при этом во втором случае составы на участке одновременно проходили пункты измерения.

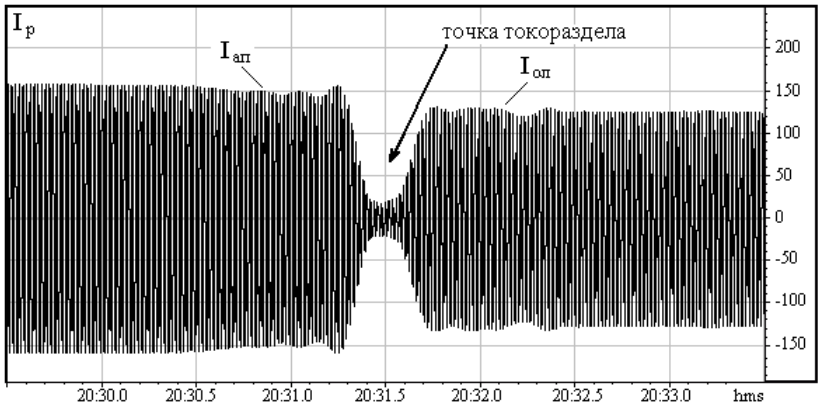


Рис. 3. Точка токораздела обратных тяговых токов

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 4 в виде гистограмм относительных (по отношению к основной гармонике) значений 3-й и 5-й гармоник тока электровозов для двух рассматриваемых случаев. Сравнение проводилось для первых двух высших гармоник, поскольку они имеют наибольшие амплитудные значения по отношению к основной гармонике (амплитуда 3-й гармоники может составлять 20–30 %, амплитуда 5-й гармоники — 10–15 %) [4].

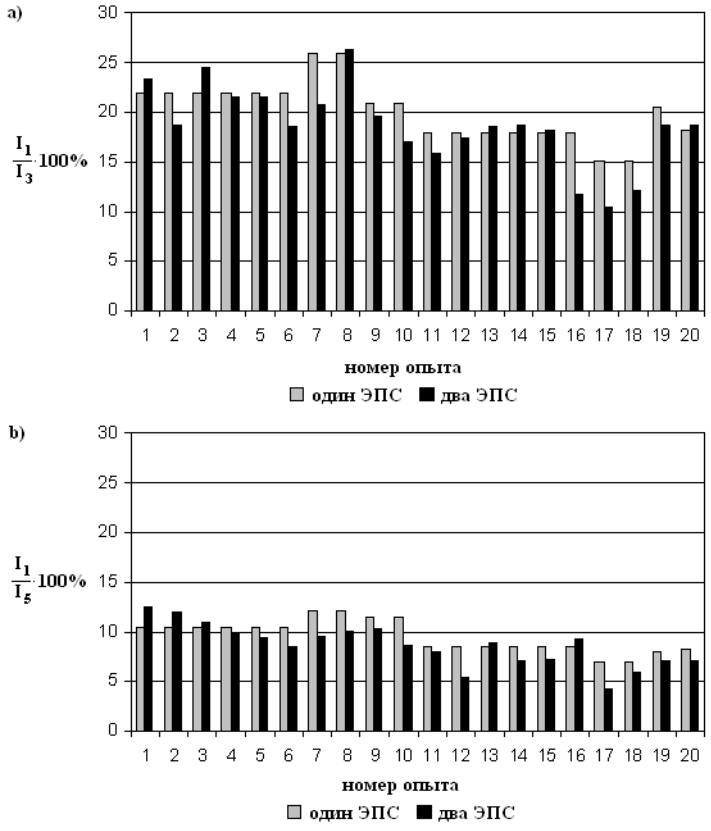


Рис. 4. Относительные спектры тока тяговой сети при одном и двух ЭПС на участке Апатиты — Оленегорск

Результаты проведенного исследования показали, что амплитудные значения 3-й гармоники тока в тяговой сети, питающей два ЭПС, в 50 % случаев оказались ниже в 1.1–1.5 раза соответствующих значений гармоник при одном ЭПС в зоне питания и том же токе, а для 5-й гармоники ниже в 1.1–1.7 раз — в 65 % случаев. В других случаях они были либо равны (3-я гармоника — 40 %, 5-я гармоника — 20 %), либо значения амплитуд высших гармоник тока при двух ЭПС в зоне питания превышали соответствующие значения при одном ЭПС в 1.1–1.25 раза (3-я гармоника — 10 %, 5-я гармоника — 15 %).

Выводы

Исследование токов в рельсовой сети, проведенное на однопутном участке железной дороги Апатиты — Оленегорск, позволило рассмотреть изменение спектра тока электровоза при появлении дополнительной нагрузки в этой межподстанционной зоне для достаточного количества экспериментов, чтобы считать результаты исследования наиболее достоверными относительно предыдущих, представленных в работе [2].

По результатам исследования можно заключить, что при значительном удалении электровозов от питающих тяговых подстанций и при прочих равных условиях появление дополнительной нагрузки в межподстанционной зоне не всегда вызывает изменение спектрального состава тока находящегося на ней электровоза, а именно уменьшает значения высших гармоник в 1.5 раза [1].

Литература

1. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 279 с.
2. Залесова О. В., Якубович М. В. Экспериментальное исследование спектрального состава тока в рельсах // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2013. № 2 (15), вып. 6. С. 97–102.
3. Исследование гармонического состава наведенного напряжения на линиях электропередачи, выведенных в ремонт ЕМТР / В. Н. Селиванов, О. В. Залесова, В. В. Колобов, А. В. Богданова, В. Ф. Данченко // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. № 1 (35), вып. 12. С. 57–68.
4. Залесова О. В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 40–45.

Сведения об авторе

Залесова Ольга Валерьевна,
младший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: Drozdova_nord@mail.ru

УДК 621.316.91

Я. Э. Еремич, С. А. Пашичева, Ф. Х. Халилов

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СЕТЕЙ ВЫСОКОГО, СВЕРХВЫСОКОГО И УЛЬТРАВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ТЕХНОСФЕРЫ И БИОСФЕРЫ

Аннотация

Решение задач электромагнитной совместимости (ЭМС) сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения, техносферы и биосферы требует понимания характера взаимодействия этих систем. В настоящей статье рассмотрены основные аспекты такой ЭМС.

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, электромагнитное влияние.

Ya. E. Eremich, S. A. Pashicheva, F. Kh. Khalilov

ISSUES OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN HV, EHV AND UHV POWER SYSTEMS, TECHNOSPHERE AND BIOSPHERE

Abstract

Solutions for EMC problems in high, extra-high and ultra-high voltage power networks require knowledge of interaction among power networks, techno sphere and biosphere. This article deals with its main aspects.

Keywords:

electromagnetic compatibility, electromagnetic disturbances, electromagnetic influence.

Введение. Значимость проблемы ЭМС в электроэнергетике в настоящее время столь же велика, как и известные проблемы экологии, энергетической безопасности и энергоресурсосбережения. Несоблюдение требований ЭМС в сетях высокого (ВН), сверхвысокого (СВН) и ультравысокого (УВН) напряжения часто приводит к огромным убыткам, которые связаны с повреждением дорогостоящего оборудования, недоотпуском электроэнергии, нарушением работы систем управления и контроля и т. д.

Все возрастающие электромагнитные поля в пространстве, окружающем мощные электроустановки, увеличение мощности, токов и напряжений в сетях указанных классов напряжения нарушают их взаимную электромагнитную совместимость с различными системами ноосферы (экосферы, биосферы или техносферы).

В зависимости от характера взаимодействия с этими системами все проблемы ЭМС электроэнергетики с ноосферой можно условно подразделить на 5 групп: 1) с окружающей средой (ЭКО–ЭМС); 2) с биосферой (БИО–ЭМС); 3) с протяженными металлическими сооружениями техносферы (ТЕХНО–ЭМС); 4) с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой (ЭЛЕКТРОНО–ЭМС); 5) внутренняя (ИНТЕР–ЭМС) — между подсистемами самой электроэнергетики.

Конечно, применяя такое разделение, следует принимать во внимание, что в условиях эксплуатации различных систем (например подстанций) и подсистем (например трансформаторов) указанные проблемы могут переплетаться и частично дублировать друг друга.

Далее в статье рассматриваются проблемы ЭМС сетей ВН, СВН и УВН с каждой из указанной систем ноосферы.

Проблемы ЭКО–ЭМС касаются вопросов атмосферного электричества, электрохимической коррозии, электромагнитных бурь и последствий отчуждения больших участков земли под подстанции и высоковольтные линии. Основные проблемы ЭКО–ЭМС представлены схематически на рис. 1 [1].

Рис. 1. ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО–ЭМС)

Наиболее тяжелые и частые нарушения нормальной работы электрических сетей ВН, СВН и УВН возникают вследствие воздействия разрядов молнии. Кратковременное напряжение в месте удара молнии может достигать миллионов вольт, что вполне достаточно для пробоя изоляции практически любой линии электропередачи, вплоть до УВН. Для защиты от прямых ударов молнии над проводами линий устанавливают тросы, а на подстанции — вертикальные молниеотводы. Для защиты от обратных перекрытий с пораженной опоры на провода необходимо каждую опору заземлить с малым (до 10 Ом или несколько больше в районах с высоким удельным сопротивлением земли) сопротивлением заземления. Для защиты оборудования подстанции применяют специальные разрядники или ограничители перенапряжений (ОПН).

Воздействие геомагнитных бурь на протяженные линии электропередачи может приводить к возникновению уравнительных токов, значения которых достигают десятков и даже сотен ампер [2]. Это может приводить к ложным отключениям этих линий вследствие неверной работы релейной защиты, к росту перетока мощности по параллельным линиям и их перегрузке с последующим отключением, т. е. к системной аварии, сопровождающейся нарушением электроснабжения потребителей на большой территории и большим экономическим ущербом. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании релейной защиты дальних электропередач.

В свою очередь, сети ВН, СВН и УВН оказывают неблагоприятное влияние на окружающую среду. Напряжения и токи в проводах ЛЭП создают в земле блуждающие токи, электрическое поле которых инициирует протекание уравнительных токов в подземных металлических устройствах. Блуждающий ток вызывает усиленную электрохимическую коррозию оболочек кабелей трубопроводов, заземлителей и других протяженных подземных сооружений. Чтобы уменьшить интенсивность коррозии, необходимо удалить подземный проводник от зоны блуждающих токов, устроить «дренаж» — отвод блуждающих токов на специальные электроды, применять «анодную» защиту.

Сети ВН, СВН и УВН создают неблагоприятные экологические последствия для окружающей местности, такие как: нарушение природного ландшафта, затруднение сельскохозяйственных работ, отчуждение больших земельных участков.

Проблемы БИО–ЭМС появляются в связи с возникновением опасных и мешающих влияний на биосферу. Схематически они представлены на рис. 2.

Главную опасность для человека представляет ток, который протекает через тело человека при прикосновении к частям электроустановки, находящимся под различными потенциалами.

Наиболее опасные напряжения прикосновения ($U_{пр}$) и шага ($U_{ш}$) возникают на подстанциях 110 кВ и выше в сетях с эффективным заземлением нейтралей трансформаторов. В большинстве случаев для обеспечения безопасности обслуживающего персонала на таких подстанциях устраивают контур защитного заземления с сопротивлением растекания не более $R_з = 0.5$ Ом. Контур охватывает всю подстанцию, а внутри его для обеспечения безопасного напряжения шага прокладывают в земле полосы, а для безопасного напряжения прикосновения вокруг оборудования (выключатели, трансформаторы и т. п.) прокладывают дополнительные контуры, выравнивающие распределение напряжения на поверхности земли. В местностях с высоким удельным сопротивлением земли допускается некоторое увеличение $R_з$, но напряжения $U_{пр}$ и $U_{ш}$ должны быть ограничены путем прокладки дополнительных полос внутри контура.

Опасные гальванические влияния вызываются большими аварийными токами короткого замыкания через заземляющие устройства подстанций и линий УВН и СВН. На мощных подстанциях ток однополюсного короткого замыкания, протекающий через контур заземления, может достигать и даже превосходить $I_з = 20$ кА. При этом напряжение на заземлении не должно превосходить $U_з = 10$ кВ. Кроме того, может представлять опасность высокое напряжение, выносимое с подстанции по рельсам, трубопроводам, оболочкам кабелей и другим протяженным металлическим предметам. В местах выхода их за пределы заземляющего контура подстанции на них необходимо предусмотреть соответствующие изоляционные устройства.

Рис. 2. ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО–ЭМС)

Специфическую опасность может представить прикосновение человека к крупногабаритному транспорту на резиновом ходу под проводами ЛЭП СВН, особенно УВН, так как под проводами линий СВН и УВН у поверхности земли имеет место повышенная напряженность электрического поля E даже в нормальном режиме работы. При $E > 20$ кВ/м прикосновение человека к крупногабаритному транспортному агрегату на резиновом ходу может быть опасным. Через человека, стоящего на земле, будет протекать значительная часть емкостного тока от проводов ВЛ к этой машине.

Исследования и анализ опыта работы показывают, что в нормальном режиме работы ВЛ оказывает неблагоприятное воздействие на окружающее население, особенно на обслуживающий персонал, вследствие воздействия магнитного и электрического полей, а также акустических помех.

Нормы и правила по охране труда временно (до дальнейшего уточнения) рекомендуют допустимую продолжительность систематического пребывания обслуживающего персонала в электрическом поле, указанную в табл. 1.

Таблица 1

Гигиенические нормативы напряженности электрического поля для персонала, обслуживающего установки СВН

Напряженность электрического поля E, кВ/м	Допустимая длительность пребывания человека в течение суток, $T_{доп.}$, мин
До 5	Без ограничения
5–10	180
10–15	90
15–20	10
20–25	5
Свыше 25	Не допустима

Приведенные в табл. 1 значения E определяются в наиболее неблагоприятном месте возможного пребывания человека при условии, что остальное время он находится в местах, где напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м. Кроме того, должны быть приняты меры, исключающие возможность воздействия кратковременных электростатических разрядов на организм человека в рабочих условиях. Значительно сложнее вопрос о нормировании допустимой напряженности электрического поля вблизи линий электропередачи. Длительное систематическое нахождение людей или животных в пределах полосы отчуждения не предусмотрено. Поэтому в настоящее время в качестве допустимой напряженности под проводами для населенной местности обычно принимается $E < 15$ кВ/м и $E < 20$ кВ/м — для ненаселенной. За пределами полосы отчуждения, где возможно длительное нахождение детей, напряженность должна быть значительно ниже ($E < 2$ кВ/м).

Акустические помехи высокой интенсивности также неблагоприятно сказываются на самочувствии людей. В отдельных элементах электрических аппаратов под влиянием переменных электромагнитных полей возникают электродинамические силы. Они пульсируют с двойной частотой (100 Гц) и создают механическую вибрацию. В последнее время внимание специалистов привлек еще один эффект ВЛ СВН, влияющий на экологическую обстановку. Речь идет о создаваемом линиями шуме. Шум можно слышать при хорошей погоде (без осадков), но особенно он усиливается при дожде. Шум вызывается коронным разрядом на проводах. Согласно СНиП ВЛ, СВН и УВН не должны приближаться к населенным пунктам ближе 300 м.

Наиболее сильные акустические помехи возникают при моросящем дожде или тумане, когда вибрирующими элементами оказываются капли воды, ионизированные коронным разрядом у поверхности провода. В результате такой вибрации ВЛ 110…220 кВ при дожде «шипят», ВЛ 330…500 кВ «гудят», а ВЛ 750 кВ «ревут».

Опасные влияния на промышленной частоте и высоких частотах относятся к сфере вопросов ТЕХНО–ЭМС. На рис. 3. схематически представлены основные проблемы ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями.

Опасное влияние — это такое влияние, которое может представлять опасность для здоровья и жизни обслуживающего систему персонала и населения, вызывать повреждение аппаратуры и приборов или ложные срабатывания цепей сигнализации и блокировки, создающие вероятность, например, железнодорожной аварии. Со всем этим приходится считаться при аварийных или ненормальных режимах работы сетей высокого напряжения.

При несимметричных коротких замыканиях в сетях с глухим заземлением нейтрали ($U_н \geq 110$ кВ) возникают большие токи в земле и сильные магнитные поля, которые могут вызвать опасные магнитные влияния. Они создают ЭДС взаимоиндукции и напряжения относительно земли в воздушных и кабельных линиях связи (ЛС), трубопроводах, транспортных сооружениях и т. п. Высокая напряженность электрического поля вблизи ВЛ может обусловить опасные влияния на воздушные линии связи, находящиеся в непосредственной близости от ВЛ. Под проводами линий СВН и УВН у поверхности земли имеет место повышенная напряженность электрического поля E даже в нормальном режиме работы.

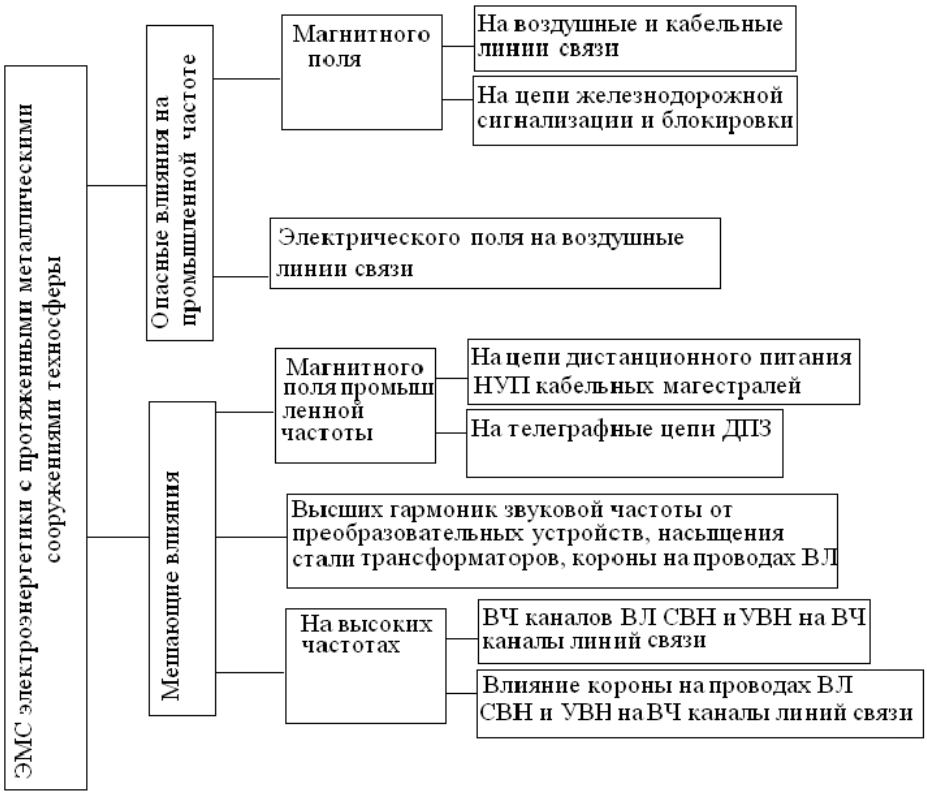


Рис. 3. Схематическая структура проблем ТЕХНО–ЭМС

Ряд мер, способствующих снижению опасных влияний, можно осуществить и на ВЛ. К их числу относятся:

- установка на ВЛ хорошо проводящих (сталеалюминевых) заземленных тросов;
- частичное разземление нейтралей трансформаторов для уменьшения токов однофазного к. з.;
- автоматический контроль состояния изоляции ВЛ с изолированной нейтралью и быстрое отключение поврежденного участка, чтобы исключить к. з. в двух точках;
- перевод ВЛ в кабельную в городских условиях, а также в пересечениях с ВЛ.

Под *мешающим влиянием* следует понимать помехи, которые возникают в сетях высокого напряжения в условиях длительного (нормального) режима их работы. Они не создают непосредственной опасности для сооружений техносферы, однако ухудшают качество, снижают надежность или создают затруднения для нормального функционирования связи, телевидения, радио и т. д.

Рабочие токи 50 Гц в проводах ВЛ образуют магнитное поле, создающее мешающее влияние в цепях дистанционного питания неуправляемых усилительных пунктов высокочастотных каналов в кабелях связи, других устройствах связи, использующих землю в качестве обратного провода.

Высшие гармоники токов и напряжений крайне нежелательны: они неблагоприятно сказываются на работе электрических сетей, создают дополнительные потери в проводах и магнитопроводах, местные перегревы, резонансные повышения напряжения и, кроме того, помехи в тональных (звуковых) каналах ЛС. Основная работа связи осуществляется по высокочастотным каналам. Однако каналы связи на звуковых частотах оказываются основными в чрезвычайных условиях, особенно при сильном гололеде на проводах ЛС, когда затухание сигналов в высокочастотных каналах сильно возрастает.

Мешающие влияния токов высокой частоты линий ВН на линии связи возникают вследствие работы высокочастотных (ВЧ) каналов и короны на ВЛ. Импульсы токов короны на проводах ВЛ СВН и УВН и изоляторах ВЛ 35–220 кВ, накладываясь друг на друга со смещением в пространстве (вдоль длины линии) и во времени, создают общий уровень высокочастотных помех в широком диапазоне частот 20...2000 кГц. Одновременно в линиях всех напряжений от 6 кВ и выше работают каналы высокочастотной связи в диапазоне 30...300 кГц. Надежная работа этих каналов может быть обеспечена, если уровень сигналов по ним значительно превышает уровень помех от короны.

ЭЛЕКТРОНО–ЭМС также содержит проблемы в виде мешающих влияний (перенапряжения, скачки напряжения и др.).

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой представлены на рис. 4.

Рис. 4. ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой

К *опасным влияниям* относятся перенапряжения в питающей сети. Даже самые кратковременные скачки напряжения в питающей сети могут привести к пробою изоляции или выходу из строя элементов электронной, особенно полупроводниковой, техники и тем самым вывести из строя ЭВМ.

Специфическое опасное влияние может возникнуть вследствие гальванического влияния со стороны заземления при внезапном к. з. в питающей сети на землю. При прохождении по заземляющему устройству токов короткого замыкания значительной силы в высоковольтных сетях в пределах заземляющего устройства возникает разность потенциалов. Кроме того, повышается среднее значение потенциала заземляющего устройства относительно земли. Таким образом, на вторичных кабелях и на входах электронной аппаратуры возникает опасная разность потенциалов.

Неустойчивое напряжение, «скачки» напряжения, а также высшие гармоники источников питания промышленной частоты оказывают мешающие влияния. Как правило, они не опасны для компьютерной электронной техники, но вызывают сбои и нечеткую работу ЭВМ и требуют включения источников питания через соответствующие фильтры. Весьма важно, чтобы совместно работающие блоки электронной техники были заземлены в одной точке, так как уравнительные токи, возникающие между отдельными землями, часто оказываются источником нежелательных помех вследствие емкостных или индуктивных электромагнитных наводок или гальванических влияний на интегральные схемы. Близко расположенные и недостаточно экранированные мощные электрические цепи могут создавать такие электромагнитные наводки в цепях питания и внутренних цепях ЭВМ, которые существенно затруднят их работу.

Частоты функционирования практически всех устройств электроносферы значительно выше промышленной частоты 50 Гц. Однако всевозможные высокочастотные электромагнитные колебания в цепях электроэнергетики создают нежелательные помехи в указанных устройствах, расположенных вблизи мощных электроэнергетических установок. Повторные зажигания и погасания электрической дуги возникают между контактами высоковольтных аппаратов, особенно разъединителей. Зажигания и погасания дуги возбуждают в коммутируемых контурах электромагнитные колебания, создающие помехи в расположенных вблизи от них электронных схемах.

Токи высокой частоты, возникающие в проводах ВЛ вследствие короны, а также токи каналов ВЧ связи по этим проводам генерируют в окружающем пространстве электромагнитные поля, создающие радиопомехи в расположенных вблизи радиоприемных устройствах. Экологические последствия от крупногабаритных сооружений нарушают условия распространения радиоволн и искажают показания радиомаяков и других направленных радиопередач.

ИНТЕР–ЭМС исследует вопросы нарушения ЭМС между различными подсистемами электроэнергетики.

Нарушения электромагнитной совместимости между различными подсистемами самой электроэнергетики приводят (рис. 5) к крайне нежелательным последствиям для нее: коммутационные, дуговые и квазистационарные перенапряжения в сетях высокого напряжения вызывают повреждения изоляции, короткие замыкания, отключения и погашения потребителей и большой народнохозяйственный ущерб. Необходимо поддерживать достаточно высокий уровень изоляции и предусмотреть

установку разрядников или ОПН на линиях СВН и УВН. Благодаря наличию вольт-амперной характеристики с нелинейной зависимостью можно эффективно отводить импульсные помехи по стандартным схемам «проводник — земля» и «проводник — проводник», не доводя помехи до входов в аппаратуру.

Переходные процессы и сопутствующие им перенапряжения присутствуют в любой электроустановке и являются одним из основных источников аварий в сетях ВН, СВН и УВН. Как правило, они имеют вид затухающих колебаний, проходят через трансформаторы и автотрансформаторы в сети других напряжений и распространяются на большие расстояния, электрически связанные с местом возникновения.

Аварии и оперативные коммутации вызывают опасные и мешающие влияния цепей высокого напряжения «первичной коммутации» на цепи «вторичной коммутации» с электронными устройствами информационной и компьютерной техники электростанций и подстанций высокого напряжения. Они аналогичны рассмотренным влияниям на устройства электроносферы и могут привести к выходу из строя или неселективной работе устройств вторичной коммутации в наиболее ответственные моменты аварий или коммутаций цепей первичной коммутации, когда от цепей вторичной коммутации требуется особенно четкая, селективная и бесперебойная работа.

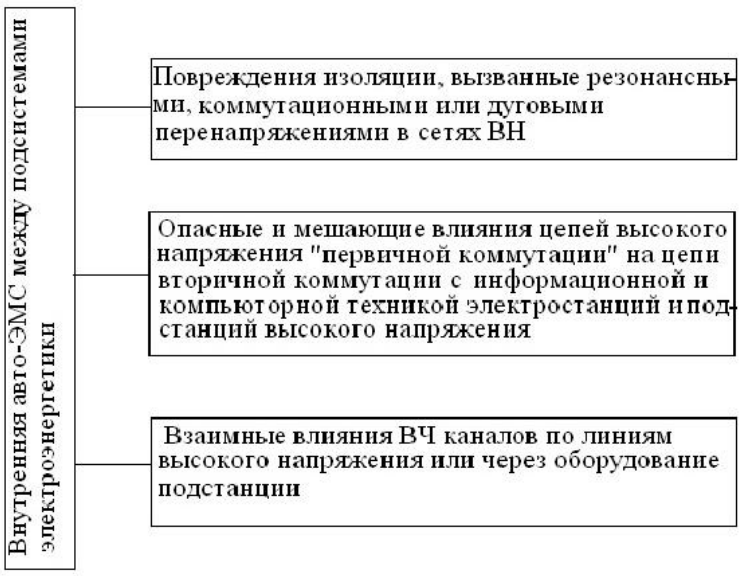


Рис. 5. Внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР–ЭМС)

К числу мер, снижающих опасные и мешающие влияния, относятся: контроль и приведение заземляющих устройств и систем выравнивания потенциалов в соответствие с актуальными требованиями МЭК, размещение чувствительной аппаратуры в шкафах с экранирующими поверхностями, прокладка силовых цепей отдельно от информационных цепей, экранирование вторичных цепей с наличием двустороннего заземления, использование информационных кабелей типа «витая пара», избегание областей с высокими уровнями электромагнитных помех, использование безопасной оптической развязки, применение шин для выравнивания потенциалов, установка барьерных заземлителей и др.

Выводы

1. Специфика современных сетей ВН, СВН и УВН такова, что невозможно без значительных инвестиций в энергообъект снизить до минимальных значений уровень опасных и мешающих нарушений ЭМС. Поэтому для каждого электронного устройства, от которого зависит безаварийная эксплуатация оборудования, требуется собственная устойчивость к электромагнитным помехам, нарушающим ЭМС.

2. Современный подход к решению проблемы ЭМС электроэнергетики заключается в строгом нормировании и стандартизации параметров аппаратуры и систем в процессе проектирования и конструирования. Такие требования, с одной стороны, должны обеспечить совместимость разнородного электрооборудования, а с другой — должны быть практически достижимыми.

Литература

1. Титков В. В., Халилов Ф. Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики техносферы и биосферы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 254 с.
2. Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова // Новости электротехники. 2013. № 2 (80). С. 30–33.
3. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. М.: Энергоатомиздат, 1989. 360 с.
4. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов, И. П. Кужекин, А. В. Жуков; под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Энергоатомиздат, 2003. 768 с.
5. Халилов Ф. Х., Егоров В. В., Смирнов А. А. Техника высоких напряжений: учебник. СПб.: БИОНТ, 2007. 540 с.
6. Половой И. Ф., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. Л.: Энергоатамиздат, 1990. 152 с.
7. Электромагнитная совместимость воздушных, подземных и подводных линий электропередачи высокого напряжения с биосферой и окружающей средой: учеб. пособие / К. П. Кадомская, С. А. Кандаков, Ю. А. Лавров, С. С. Шевченко. Новосибирск: НГТУ, 2007. 150 с.
8. Жгун Д. В. Электромагнитная совместимость высоковольтной техники: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2008. 150 с.

Сведения об авторах

Еремич Яна Эдвардовна,
аспирант кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: yana.eremich@gmail.com

Пашичева Светлана Александровна,
аспирант кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: pashicheva.sv@gmail.com

Халилов Фирудин Халилович,
профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,
заслуженный деятель науки и техники, действительный член Академии
электротехнических наук, д. т. н.
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: firudin-khalilov@yandex.ru

УДК 621.316.91

Я. Э. Еремич, С. А. Пашичева, Ф. Х. Халилов

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ В СЕТЯХ 0.4–35 кВ

Аннотация

Данная работа направлена на разработку рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств на основе электроники за счет ёмкостной, гальванической, индуктивной связи или связи через излучение с другими электрическими цепями и электромагнитными процессами, протекающими на объектах электроэнергетики 0.4–35 кВ.

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, защита электроники, помехи, электрические цепи.

Ya. E. Eremich, S. A. Pashicheva, F. Kh. Khalilov

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND ELEMENTS RELIABILITY OF 0.4–35 kV ELECTRICAL NETWORKS

Abstract

The article aims to develop recommendations for the electromagnetic compatibility of technical means on the basis of electronics due to capacitive, galvanic, inductive coupling or connection through radiation from other electrical circuits and electromagnetic processes occurring at 0.4–35 kV electric power facilities.

Keywords:

electromagnetic compatibility, electronics protection, interference, electrical circuits.

Введение. Ранее распространённые системы релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), телемеханики и управления на основе электромеханической элементной базы обладали высоким запасом электрической прочности изоляции и относительно низким быстродействием. Вследствие этого импульсные помехи не предоставляли для них той опасности, как это имеет место в случае использования электронных технических средств (ТС).

Технические средства на основе электроники, ввиду высокого быстродействия, низких уровней рабочих сигналов, широкополосности трактов передачи данных, имеют повышенную чувствительность к помехам.

Основным мероприятием по обеспечению ЭМС является грамотная компоновка электрооборудования и электрических цепей на территории энергообъектов, что требует чёткого представления о механизмах влияния электрических цепей друг на друга.

В тех случаях когда ЭМС не обеспечивается только компоновочными решениями, применяются вспомогательные мероприятия, а именно: экранирование ТС и их цепей, выбор и расстановка в проблемных местах устройств защиты от импульсных помех (УЗИП).

Источники электрических помех на объектах электроэнергетики. Источниками электрических помех являются:

- молниевые разряды вследствие протекания больших импульсных токов в протяжённых каналах разряда, а в случае прямого удара в молниеприёмник объекта — протекание токов в металлоконструкциях и заземляющем устройстве (ЗУ), сопровождающиеся всплеском электромагнитных полей и появлением больших разностей потенциалов на ЗУ;
- сети электроснабжения, генерирующие в режимах коротких замыканий (КЗ) сильные электрические и магнитные поля, а токи КЗ протекающие в ЗУ создают опасные разности потенциалов на территории объекта;
- электрооборудование, не оснащённое средствами уменьшения пусковых токов и подавления перенапряжений при его отключении вследствие генерации индуктивными элементами (катушками соленоидов, контакторов, реле, газоразрядных ламп и т. п.) ЭДС самоиндукции больших уровней;
- статическое электричество, создающее высокие потенциалы, опасные для изоляции ТС; токи, сопровождающие разряды статического электричества, способны трансформироваться во внутренние цепи ТС, вызывая сбои в их работе и даже повреждения;
- радиопередатчики и все электрические цепи в момент переходных процессов вследствие излучения ими высокочастотных электромагнитных полей.

Проявление электрических помех. В общем случае энергия от источника помехи в той или иной мере передаётся во все рядом расположенные электрические цепи и далее на входы ТС.

ЭМС нарушается, если индуцированные источником помехи токи, напряжения, электрические, магнитные или электромагнитные поля способны нарушить нормальное функционирование рассматриваемой цепи или ТС. В некоторых случаях источники помех через создаваемые ими магнитные поля, проникая непосредственно в ТС, наводят помехи во внутренних низковольтных цепях ТС, вызывая сбои в работе и повреждение ТС.

В подавляющем большинстве систем измерения и управления используется двухпроводная схема передачи электрического сигнала от источника к приёмнику. Линии связи с передачей информации в виде разности потенциалов на проводах лучшим образом защищены от влияния внешних электрических цепей.

При анализе воздействия источника помехи на линию связи необходимо рассматривать одновременно следующие электрические цепи: два контура вида «провод — земля» и один контур вида «провод — провод» (рис. 1).

С учётом наводок напряжений на линии связи принято различать следующие виды помех:

- помеха нормального вида (поперечная, дифференциальная, вида «провод — провод») — напряжение помехи данного вида действует между проводами электрической линии и поступает на вход ТС подобно рабочему сигналу, вызывая сбои в работе ТС;
- помеха общего вида (синфазная, несимметричная, продольная, вида «провод — земля»). Помехи данного вида создают напряжение, прикладываемое между проводом линии и землёй. В первую очередь такие помехи опасны для изоляции проводов линий и входных цепей ТС. При определённых условиях помехи данного вида способны трансформироваться в помехи нормального вида.

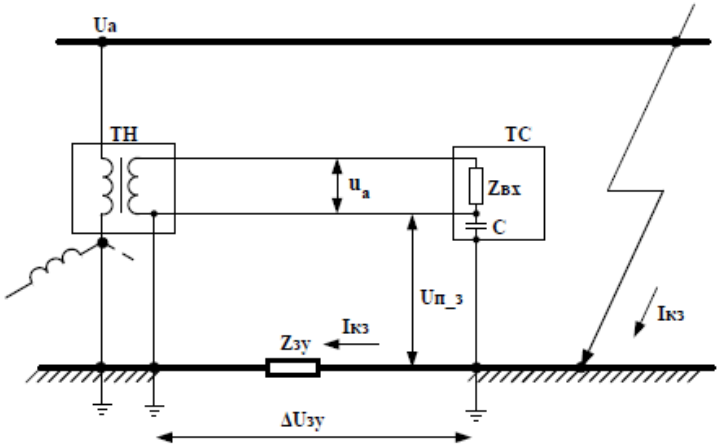


Рис. 1. Проявление гальванической связи цепей через ЗУ

Гальваническая (кондуктивная) связь электрических цепей. Гальваническая связь цепей имеет место, если цепь источника помехи и анализируемая цепь связаны общим сопротивлением. Чаще всего в качестве общего элемента двух цепей выступает ЗУ. Протекание по ЗУ больших токов при ударах молнии или коротких замыканиях в сети электроснабжения сопровождается возникновением разности потенциалов на ЗУ. Разность потенциалов на ЗУ может передаваться в другие электрические цепи в случае их гальванической связи.

Например (рис. 1), при КЗ в электроустановке по ЗУ с сопротивлением $Z_{зу}$ протекает большой ток $I_{кз}$, создавая разность потенциалов $\Delta U_{зу}$ в системе заземления. Эта разность потенциалов проявляется в виде синфазной помехи $U_{п_з}$ в слаботочной вторичной цепи ТС с рабочим сигналом u_a .

Падение напряжения на ЗУ, приводящее к появлению помехи вида «провод — земля» определяется следующим выражением:

$$U_{п-з} = \Delta U_{зу} = R_{зу} * I_{кз} + L_{зу} * \frac{dI_{кз}}{dt}.$$

При протекании по ЗУ тока промышленной частоты 50 Гц индуктивная составляющая сопротивления ЗУ проявляется слабо. Например, при протекании по ЗУ тока промышленной частоты 50 Гц с действующим значением $I_{кз}$ = 25 кА падение напряжения на активной составляющей 1 погонного метра стального стержня диаметром 10 мм составит по амплитуде:

$$\Delta U_R = R_{зу} * I_{кз} = \frac{\rho * l}{S} * I_{кз} = \frac{13.8 * 10^{-8} * 1}{\frac{\pi * (10 * 10^{-3})^2}{4}} * 25 * 10^3 * \sqrt{2} = 62 \text{ В}.$$

Погонная индуктивность круглого проводника мало зависит от его сечения и в первом приближении может быть принята равной $L_{уд} \approx$ 1мкГн/м. Соответственно, падение напряжения на индуктивной составляющей метрового стержня составит:

$$\Delta U_L = L_{уд} * \frac{d(I_{кз})}{dt} = L_{уд} * \left(\omega * I_{кз}\sqrt{2}\right) = 1 * 10^{-6} * 3.14 * 25 * 10^3 * 1.41 = 11 \text{ В}.$$

Однако при протекании по ЗУ быстроизменяющегося тока молнии индуктивность проводников вносит наибольший вклад в создание разности потенциалов.

Например, скорость изменения тока молнии амплитудой 25 кА на фронте длительностью 10 мкс составляет:

$$\frac{dI_м}{dt} = \frac{\Delta I_м}{\Delta t} = \frac{25 * 10^3}{10 * 10^{-6}} = 2.5 * 10^9 \frac{A}{c}.$$

Падение напряжения от протекания тока молнии на 1 м такого проводника достигает:

$$\Delta U_{уд} = L_{уд} * \frac{\Delta I_м}{\Delta t} = 1 * 10^{-6} * 2.5 * 10^9 = 2.5 * 10^3 \text{ В},$$

следовательно, разность потенциалов на ЗУ при растекании тока молнии может достигать сотен киловольт.

Для снижения наводок напряжения в цепях вторичной коммутации гальванически связанных с ЗУ, необходим расчет ЗУ.

Индуктивная связь цепей. Воздействие электрических цепей друг на друга посредством магнитного поля называется индуктивной связью. В качестве источника помехи, как правило, выступает цепь с большим или быстро изменяющимся током.

Рисунок 2 иллюстрирует индуктивную связь молниеприёмника с трактом измерения напряжения электроустановки.

Как известно, вокруг любого проводника с током *I* возникает магнитное поле, напряжённость *H* и индукция *B* которого на удалении от оси проводника *r* определяются выражениями:

$$H = \frac{I}{2\pi r}; \qquad \text{В} = \mu * \mu_0 * H,$$

где μ, μ_o — относительная и абсолютная проницаемость окружающей среды.

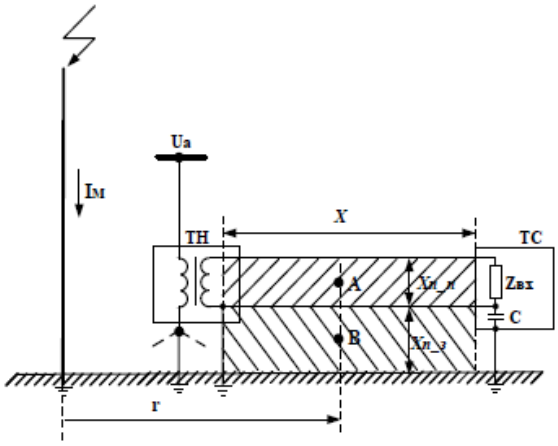


Рис. 2. Проявление индуктивной связи цепей

Магнитный поток, пронизывающий некий электрический контур площадью *S*, наводит в нем ЭДС в соответствии с выражением:

$$e(t) \approx S\frac{dB}{dt} = S * \frac{\mu\mu_0}{2\pi r}\frac{dI}{dt}.$$

Следует обратить внимание, что индуцируемая ЭДС определяется не столько током, создающим магнитное поле, сколько скоростью изменения тока. Например, импульсный ток с очень крутыми фронтами и спадами индуцирует ЭДС, стремящуюся в бесконечность:

$$e_{\text{п}-\text{п}} = S\frac{\mu\mu_0}{2\pi r_{\to 0}} * \left(\frac{dI}{dt_{\to\infty}}\right) \to \infty.$$

Следовательно, с позиций ЭМС недопустима прокладка в одном кабеле слаботочных цепей и цепей с быстро изменяющимся током, например цепей управления. С другой стороны, индуцируемая в контуре ЭДС пропорциональна его площади. Следовательно, необходимо всячески избегать образования слаботочными цепями контуров большой площади. Из этих соображений категорически недопустимо использовать в качестве прямого и обратного проводов цепи жилы из разных контрольных кабелей.

Непосредственно для самих ТС как аппаратов опасность представляет напряжённость магнитного поля в районе их расположения. Например, напряжённость магнитного поля на удалении 30 м от молниеприёмника с током 100 кА достигает значения порядка:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{100 * 10^3}{2\pi * 30} = 530\frac{\text{А}}{\text{м}},$$

что может быть неприемлемо для многих ТС. Обратим внимание на то обстоятельство, что напряжённость магнитного поля изменяется по обратно пропорциональной зависимости: резко уменьшаясь с удалением от проводника с током и достигая очень больших значений непосредственно вблизи проводника.

По этой причине основным мероприятием борьбы с влияниями через магнитное поле является удаление слаботочных цепей из зоны проводников с большим и быстро изменяющимся током.

В качестве вспомогательных мероприятий по уменьшению влияния через магнитное поле является применение магнитных экранов.

Для экранирования низкочастотных полей менее 4 кГц эффективны лишь магнитостатические экраны. Такие экраны, выполненные из достаточно толстых ферромагнитных элементов (например стальные трубы, шкафы и т. п.), концентрируя в себе силовые линии возмущающего магнитного поля, уменьшают поле в области защищаемых цепей. В высокочастотных полях магнитостатические экраны теряют свою эффективность, в частности, из-за «скин-эффекта» и насыщения.

В области высокочастотных полей эффективное экранирование обеспечивают экраны из хорошо проводящих материалов (медь, алюминий). Экранирующие свойства таких экранов обусловлено вихревыми токами,

которые создают встречно направленное магнитное поле, компенсирующее порождённое их возмущающее поле. Наиболее эффективную защиту обеспечивает экран, заземляемый на обоих концах слаботочной линии. Эффективное экранирование обеспечивает прокладка кабелей в грунте.

Ёмкостная связь цепей отражает передачу энергии из одной цепи в другую посредством электрического поля. В качестве источника помехи, как правило, выступает цепь с большим электрическим зарядом или с высоким потенциалом. Рисунок 3 иллюстрирует ёмкостную связь проводника с потенциалом $E_{\text{п}}$ с чувствительной цепью.

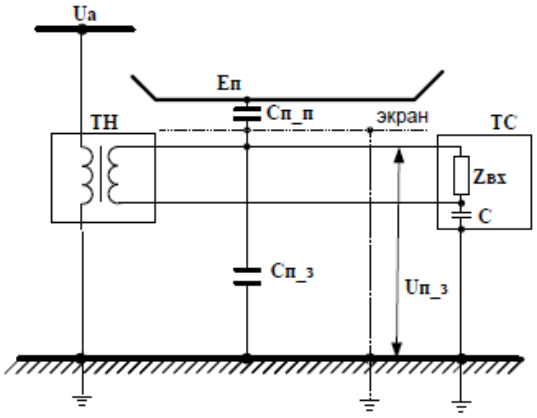


Рис. 3. Проявление ёмкостной связи электрических цепей

Напряжение на проводе чувствительной цепи $U_{\text{п_з}}$ определяется потенциалом цепи помехи $E_{\text{п}}$ и характеристиками делителя напряжения, образованного эквивалентным сопротивлением между проводами взаимодействующих цепей и сопротивлением провода чувствительной цепи относительно земли:

$$U_{\text{п}-\text{з}} = E_{\text{п}} * \frac{z}{z_{\text{п}-\text{п}} * z_{\text{п}-\text{з}}} = E_{\text{п}} * \dot{K} \, .$$

Коэффициент деления $\dot{K}$ в общем случае является комплексной величиной.

В случае, если сопротивление провода чувствительной цепи относительно земли носит ёмкостной характер, то коэффициент деления будет вещественным, однозначно меньшим 1 и независимым от частоты:

$$\dot{K} = \frac{C_{\text{п}-\text{з}}}{C_{\text{п}-\text{п}} + C_{\text{п}-\text{з}}} < 1 \, .$$

В случае если связи провода чувствительной цепи с землёй носит характер активного сопротивления, то коэффициент деления будет комплексной величиной, а его модуль будет стремиться к 1 с увеличением частоты возмущающего воздействия:

$$\dot{K} = \frac{j\omega * R_{\text{п}-\text{з}} * C_{\text{п}-\text{п}}}{1 + j\omega * R_{\text{п}-\text{з}} * C_{\text{п}-\text{п}}}; \; |\dot{K}| =\leq 1 \, .$$

Если связь провода чувствительной цепи с землёй носит индуктивный характер, то коэффициент деления при резонансе будет стремиться к бесконечности:

$$\dot{K} = \frac{-\omega^2 * L_{\text{п}-\text{з}} * C_{\text{п}-\text{п}}}{1 - \omega^2 * L_{\text{п}-\text{з}} * C_{\text{п}-\text{п}}};\ |\dot{K}| \to \infty_{\text{при } \omega^2 * L_{\text{п}-\text{з}} * C_{\text{п}-\text{п}} \to 1}\ .$$

Следовательно, с позиции ЭМС ёмкостная связь электрических цепей является непредсказуемой, а в случае резонансных явлений может быть весьма опасной даже с удалением цепей друг от друга.

Эффективным мероприятием по устранению ёмкостной связи цепей является размещение между ними заземлённого электростатического экрана, который перехватывает и замыкает на землю силовые линии электрического поля, тем самым защищая чувствительную цепь от его воздействия. Эффективную защиту от электрических полей обеспечивают заземлённые экраны из любого, даже не очень хорошо проводящего, материала, например из меди, алюминия, свинца, стали. Роль электростатического экрана способен выполнять даже отдельный заземлённый проводник, расположенный между взаимодействующими цепями, благодаря тому, что концентрирует на себе силовые линии возмущающего электрического поля.

Воздействие электромагнитным излучением. В пределах так называемой зоны ближнего влияния протяжённостью, соизмеримой с длиной волны колебаний, источник помехи воздействует на чувствительную цепь за счёт явно выраженного магнитного или электрического полей.

На расстояниях больше длины волны электромагнитных колебаний, в так называемой дальней зоне взаимодействия, т. е. при выполнении условий:

$$r > \lambda/2\pi;\ \lambda \approx c/f,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; f — частота тока в цепи помехи, Гц, воздействие осуществляется через электромагнитное поле.

Интенсивность воздействия электромагнитного поля на цепь помехи зависит от ряда факторов, в частности, от геометрических размеров проводников цепи и их соизмеримости с длиной волны поля.

В области радиочастотного диапазона интенсивность воздействия оценивается через напряжённость электрического поля *E*, связанную с ЭИМ (эффективной излучаемой мощностью) с помощью нижеследующего выражения (согласно МЭК 61000-2-3):

$$E = k(\text{ЭИМ})^{0.5} * r^{-1}, \text{при } k = 3..7.$$

Ниже приведены сведения о необходимой удалённости источников радиочастотного излучения от ТС, чтобы напряжённость поля не превышала предельное значение для ТС, а именно: *E* = 10 В/м:

- радиостанция ДВ-диапазона с ЭИМ порядка 2500 кВт — более 1100 м;
- радиостанция СВ-диапазона с ЭИМ порядка 800 кВт — более 600 м;
- радиостанция КВ-диапазона с ЭИМ порядка 10 кВ — более 10 м;
- телевидение МВ-диапазона с ЭИМ порядка 320 кВт — более 400 м;
- телевидение ДМВ-диапазона с ЭИМ порядка 500 кВт — более 500 м;
- радарные установки с ЭИМ порядка 10000 кВт — более 2200 м;
- мобильные средства связи с ЭИМ порядка 130 Вт — более 8 м;
- сотовые телефоны и радиостанции с ЭИМ до 5 Вт — более 1.5 м.

Следует отметить, что стены или перекрытия зданий и металлические шкафы существенно ослабляют действие электромагнитного поля.

Статическое электричество. Разряд статического электричества на слаботочную цепь представляет опасность как вследствие попадания в слаботочную цепь высокого потенциала, так и вследствие протекания импульсного тока с коротким (наносекундным) фронтом, что в конечном итоге может вызвать сбой в работе или повреждение ТС.

Выводы

1. Рекомендации по уменьшению гальванических связей цепей.

Следует стремиться.

- К предельно возможному уменьшению общего сопротивления гальванически связанных цепей. Например, уменьшению гальванических наводок на слаботочные цепи через ЗУ способствует снижение сопротивления ЗУ в створе прохождения кабельных трасс. Рекомендуется прокладка кабелей вдоль заземлённых металлоконструкций большого сечения и прокладка вдоль кабельной трассы дополнительных горизонтальных заземляющих проводников.
- К предельно возможному уменьшению индуктивной составляющей общего сопротивления цепей. Снижению индуктивного сопротивления проводника способствует увеличение соотношения между шириной проводника и его длиной. Уменьшению индуктивности ЗУ способствует сетчатое расположение уравнивающих проводников.
- К такому расположению молниеприёмников относительно горизонтальных проводников ЗУ, чтобы исключалось растекание токов молнии в створе прокладки кабельных трасс. Молниеприёмники целесообразно располагать по периферии площадки объекта, вдали от кабельных трасс. Уменьшению гальванической связи через ЗУ способствует применение тросовых и сетчатых молниеприёмников с удалением их молниеспусков из зоны кабельных трасс. Не допускается сближение кабельных трасс с молниеприёмниками менее чем на 10 м [ГОСТ 30804-2013].

2. Рекомендации по уменьшению индуктивных связей цепей.

- Следует стремиться к удалению чувствительных цепей и ТС из зоны цепей с большими или быстроизменяющимися токами. В частности, следует избегать прокладку контрольных кабелей вблизи молниеприёмников и проводников ЗУ, обтекаемых большими токами.
- Уменьшению наводок индуктивного происхождения способствует максимальное уменьшение площадей, занимаемых в пространстве как защищаемой слаботочной цепью, так и цепью, создающей возмущающее магнитное поле. Категорически недопустимо использовать в качестве прямого и обратного проводов электрической цепи жилы, принадлежащие разным контрольным кабелям.
- Для чувствительных электрических цепей при необходимости следует применять экранированные кабели, а их ТС располагать в металлических шкафах. Кабели с чувствительными цепями желательно прокладывать в грунте, как можно ближе к поверхности грунта или вдоль заземлённых металлоконструкций.
- Уменьшению наводок от индуктивных связей способствует применение симметричных проводных линий и кабелей с витыми парами жил.
- По возможности следует применять оптоволоконные линии связи.

3. Рекомендации по уменьшению ёмкостных связей цепей.

- Следует стремиться удалять чувствительные цепи из зоны высоковольтных цепей.
- Эффективную защиту чувствительных электрических цепей от внешних электрических полей обеспечивает применение заземлённых экранированных или бронированных кабелей, прокладка кабелей в заземлённых металлических лотках и под слоем грунта.

4. Рекомендации по уменьшению воздействия излучением.

- Технические средства должны размещаться в зонах с допустимым значением напряжённости электромагнитного поля.
- При необходимости ТС должны размещаться в специальных металлических шкафах, обеспечивающих должное экранирование полей известной частоты.
- Для исключения влияния на ТС электромагнитного излучения мобильных источников (сотовые телефоны, переносные радиостанции) необходимо предусматривать организационные мероприятия, ограничивающие их использование вблизи чувствительных ТС.

5. Рекомендации по уменьшению воздействий электростатики.

- В помещениях с ТС следует использовать антистатические напольные покрытия и размещать под ними сетки заземляющих проводников для уравнивания потенциалов.
- Одежда персонала не должна быть из синтетических тканей.
- В помещениях с ТС следует поддерживать нормальную влажность воздуха, особенно в зимнее время.
- При работе с ТС необходимо использовать антистатические браслеты.

Литература

1. Защита сетей 6 ÷ 35 кВ от перенапряжений / под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаевой. СПб.: Энергоатомиздат, СПО, 2002. 259 с.
2. Горюнов А. К., Таджибаев А. И., Халилов Ф. Х. Электромагнитная совместимость в сетях низкого напряжения и меры борьбы с ее нарушениями: учеб. пособие. СПб.: ПЭИПК, 2002.
3. Перенапряжения в сетях 6 ÷ 35 кВ / Ф. А. Гиндулин, В. Г. Гольдштейн, А. А. Дульзон, Ф. Х. Халилов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 192 с.
4. Костенко М. В., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. Электромагнитная совместимость: учеб. пособие. Ч. 1. Электроэнергетика. СПб.: СПбГПУ, 1997.
5. Фоминич Э., Костроминов А., Ланно В. Защита элементов электротехники и электроники от воздействия мощных электромагнитных помех // Военно-строит. бюлл. 1992. № 1.
6. СТО Газпром 2-1.11-290-2009 Положение по обеспечению электромагнитной совместимости производственных объектов ОАО «Газпром». М.: ОАО «Газпром», 2009. 29 с.

Сведения об авторах

Еремич Яна Эдвардовна,
аспирант кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: yana.eremich@gmail.com

Пашичева Светлана Александровна,
аспирант кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: pashicheva.sv@gmail.com

Халилов Фирудин Халилович,
профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,
заслуженный деятель науки и техники, действительный член Академии
электротехнических наук, д. т. н.
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Эл. почта: firudin-khalilov@yandex.ru

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 620.9 (470.21)

Н. М. Кузнецов, А. М. Клюкин, С. Н. Трибуналов

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация

Собраны и проанализированы сведения об объёме используемых энергетических ресурсов и показателях энергетической эффективности. Произведена оценка возможной экономии энергетических ресурсов. Рассмотрены направления энергосбережения.

Ключевые слова:

энергосбережение, энергоэффективность, электропотребление, теплопотребление, интегральный показатель, энергосберегающие мероприятия.

N. M. Kuznetsov, A. M. Klyukin, S. N. Tribunalov

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY INCREASE IN THE MURMANSK REGION

Abstract

Data on the amount of energy resources used as well as data on energy efficiency indicators have been collected and analyzed. Evaluation of possible energy saving has been made. Energy saving directions have been considered.

Keywords:

energy saving, energy efficiency, power consumption, heat consumption, integral indicator, energy-saving measures.

Надежное и экономически эффективное энергоснабжение имеет большое значение для обеспечения нормальной жизнедеятельности всех категорий потребителей. Получение электрической и тепловой энергии до сих пор в основном базируется на использовании ископаемых видов топлива, запасы которых велики, но не безграничны. Это требует бережного и экономного расходования традиционных энергетических ресурсов, более широкого внедрения мероприятий по повышению энергоэффективности и энергосбережению. Энерго- и ресурсосбережение является одним из важнейших факторов, обеспечивающих эффективность функционирования отраслей экономики. Оно достигается посредством реализации мероприятий по энергосбережению, своевременным переходом к новым техническим решениям, повышением качества продукции, использованием международного опыта и другими мерами. Внедрение энергосберегающих технологий приводит к снижению издержек, способствует повышению устойчивости топливно-энергетического комплекса, снижению затрат на введение дополнительных мощностей, улучшению экологической ситуации.

На Кольском полуострове разрабатываются месторождения различных видов минерального сырья (рис. 1), из которых наибольшее значение для развития экономики имеют медно-никелевые, железные, апатит-нефелиновые руды, руды редких и редкоземельных металлов. Существенны запасы слюды, сырья для строительных материалов и керамических изделий, облицовочного камня.

Административно Мурманская область состоит из 12 городских округов, 5 муниципальных районов, 13 городских поселений, 10 сельских поселений. Площадь Мурманской области составляет 144.9 тыс. кв. км (0.86 % площади России), численность населения на 01.01.2017 г. составила 758.0 тыс. чел., плотность населения 5.23 чел/км^2, удельный вес городского населения 92.5 %. Демографическая ситуация в Мурманской области и городах имеет кризисный характер. За последние 25 лет численность населения области сократилась на 34 % (рис. 2).

Топливно-энергетический баланс Мурманской области в настоящее время формируется в основном за счет привозного топлива (угля, нефтепродуктов, ядерного горючего). Собственных источников топлива регион не имеет. Около 80 % отпускаемой тепловой энергии вырабатывается котельными, работающими на привозном мазуте [1].

Это топливо зачастую доставляется за тысячи километров с использованием различных видов транспорта и имеет высокую транспортную составляющую в конечной стоимости. Оно используется для выработки тепловой и электрической энергии, обеспечения работы транспортных средств, для удовлетворения технологических нужд предприятий и в других целях. В отдельных районах часть энергетических потребностей удовлетворяется за счет использования местных энергетических ресурсов, например гидроэнергетических. Рост цен на органическое топливо способствовал значительному росту тарифов на электрическую и тепловую энергию. Потребление мазута и дистиллятного топлива для дизельных электростанций уменьшилось. Возросло внимание к использованию на теплогенерирующих установках угля, стоимость которого существенно ниже. Но переход на уголь увеличит нагрузку на магистральный транспорт и негативное воздействие на окружающую среду.

Суммарный годовой расход топливно-энергетических ресурсов в Мурманской области составляет около 10 млн т условного топлива (т у. т.). Из них 40 % приходится на ресурсы ядерного топлива, используемые на Кольской АЭС. Около 22 % представляют собой гидроэнергоресурсы, преобразуемые в электроэнергию на 17 ГЭС региона. Остальные 38 % — это органическое топливо (мазут, уголь, светлые нефтепродукты, газ и др.). Оно сжигается на котельных и ТЭЦ, расходуется на технологические нужды в промышленности, транспорте и т. д.

Повышение уровня энергетической эффективности в сфере электро- и теплоснабжения затрагивает все отрасли экономики и социальную сферу, всех производителей и потребителей энергетических ресурсов. Основной потенциал энергосбережения в Мурманской области (рис. 3) сосредоточен на источниках производства электрической и тепловой энергии (32 %) и в жилищном фонде (35 %).

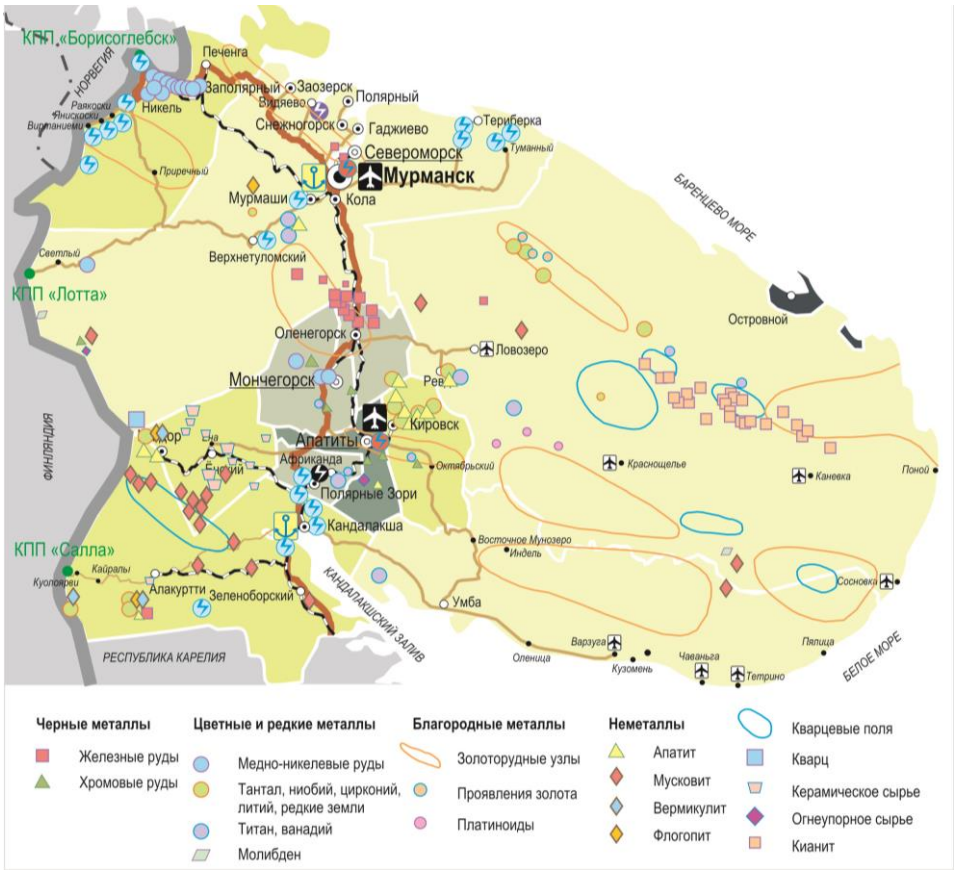


Рис. 1. Минеральные ресурсы Мурманской области

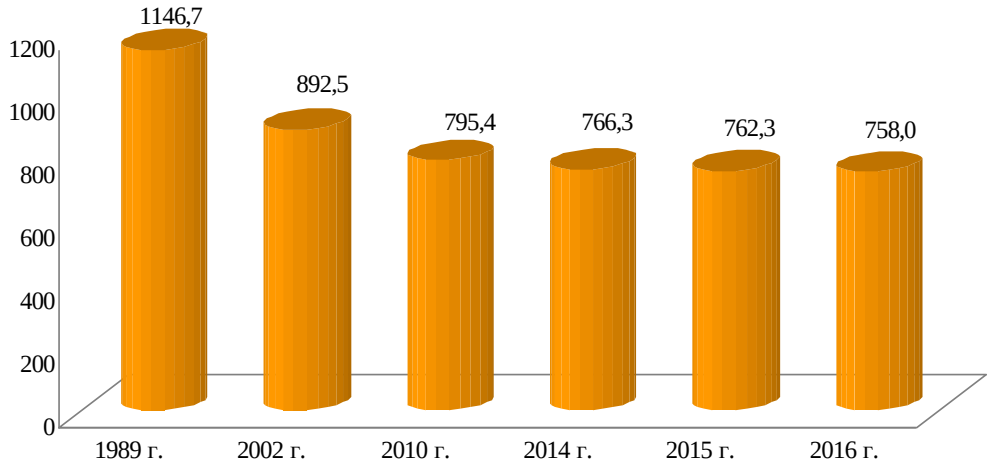


Рис. 2. Численность населения Мурманской области, тыс. чел.

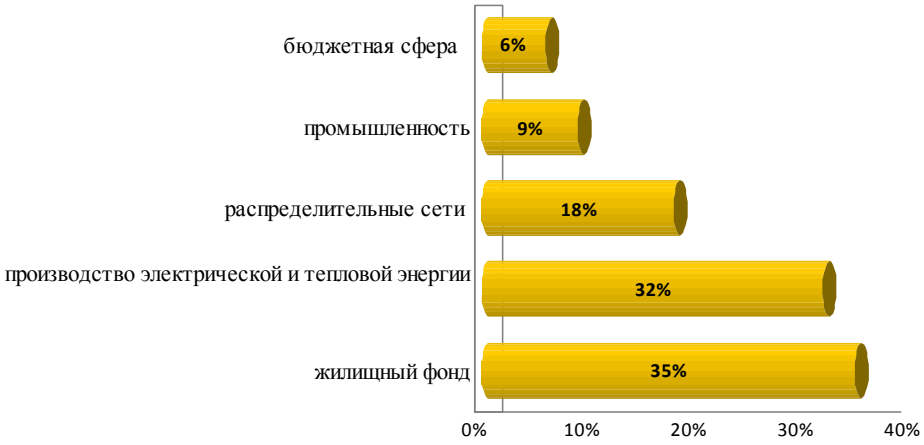


Рис. 3. Потенциал энергосбережения

Интегральный показатель энергосбережения и энергоэффективности региона (энергоемкость валового регионального продукта) позволяет сделать вывод об эффективности внедрения наилучших доступных технологий по экономии энергоресурсов (рис. 4).

Реализация нового подхода к разработке региональных программ энергоэффективности должна осуществляться по следующим направлениям:

- вовлечение региональных отраслевых органов власти в решение вопросов в области энергоэффективности и энергосбережения;
- развитие региональной инфраструктуры в сфере энергоэффективности за счет формирования уполномоченного органа, осуществляющего сводные функции и наделенного необходимыми ресурсами;
- направлять бюджетные средства, предназначенные для повышения энергоэффективности, на привлечение ресурсов коммерческих организаций;
- формирование комплексной системы учета и мониторинга в сфере энергоэффективности.

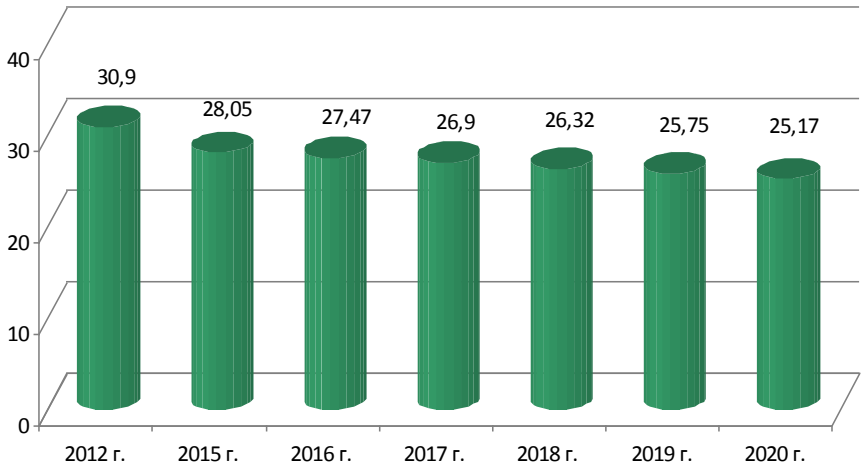


Рис. 4. Энергоёмкость валового регионального продукта, кг у. т/тыс. руб.

Согласно методическим рекомендациям, сформированным при разработке Схем теплоснабжения потребителей Мурманской области, наиболее вероятными были признаны следующие сценарии развития энергетики региона.

1. Газификация Мурманской области без опоры на Штокмановское газоконденсатное месторождение (ШГКМ).

2. Газификация г. Мурманска с учетом поступления газа с ШГКМ.

3. Отсутствие газификации и сохранение мазутозависимости.

С учетом отложенной программы газификации Мурманской области, связанной с освоением ШГКМ, в рамках актуализации Схемы теплоснабжения на 2017 год рассмотрены два наиболее вероятные сценария развития энергетики региона [2].

Сценарий 1. Сохранение мазутозависимости для существующих источников и строительство новых на жидком и твердом топливе.

Сценарий 2. Переход энергетики Мурманска на твердое топливо и электроэнергию (базируется на сценарии, разработанном в рамках Комплексного инвестиционного проекта по модернизации системы теплоснабжения Мурманской области на 2015–2030 годы).

Сценарий 1 предполагает сохранение существующего положения в топливно-энергетическом комплексе Мурманской области. Он предполагает в первую очередь повышение эффективности сжигания мазута на существующих котельных и ТЭЦ, внедрение мероприятий по снижению собственных нужд, проведение мероприятий по снижению потерь в тепловых сетях и повышение энергоэффективности существующей жилой и социально-административной застройки на территории г. Мурманска, а также строительство новых котельных на жидком и твердом топливе.

Сценарий 2 базируется на решениях, предложенных Комплексным инвестиционным проектом модернизации системы теплоснабжения Мурманской области на 2015–2030 годы, разработанным ФГБУ «РЭА» Минэнерго России в 2015 г. Согласно этому сценарию осуществляется уход от мазутозависимости на всех источниках кроме Мурманской ТЭЦ, где переход на твердое топливо технически невозможен. При этом вместо маломощных котельных в поселках Абрам-мыс и Дровяное предлагается строительство новых электрокотельных, подключенных к электросетям по уровню напряжения ВН. Данный сценарий может рассматриваться в случае, если снабжение региона мазутом не сможет осуществляться в дальнейшем по экономическим или техническим причинам.

Необходимо выполнять постоянную работу по актуализации схем теплоснабжения городов, которая представляет собой комплексную проблему и влияет на капитальные вложения в теплоснабжающие системы. Схемы разрабатываются на основе программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры, анализа фактических тепловых нагрузок потребителей с учётом перспективного развития, структуры топливного баланса региона, оценки состояния существующих источников тепла и тепловых сетей, возможности их дальнейшего использования и рассмотрения вопросов надёжности и экономичности.

Анализ работы систем теплоснабжения городов показывает, что необходимо выполнение следующих мероприятий для повышения надежности, качества и эффективности работы теплоэнергетического комплекса Мурманской области:

- проведение энергетического аудита объектов систем теплоснабжения;
- оптимизация режимов работы теплоисточников, количества котельных и их установленной мощности с учетом корректировок схем теплоснабжения, местных условий и видов топлива;
- модернизация котельных с использованием энергоэффективного оборудования с высоким коэффициентом полезного действия; использование теплонакопителей [3] на котельных.
- внедрение систем автоматизации работы и загрузки котлов, общекотельного и вспомогательного оборудования, автоматизация отпуска тепловой энергии потребителям;
- оснащение объектов системы теплоснабжения (ЦТП, котельных и тепловых узлов) приборами учета;
- замена тепловых сетей с использованием энергоэффективного оборудования, применение эффективных технологий по тепловой изоляции вновь строящихся тепловых сетей и при восстановлении разрушенной изоляции;
- использование систем централизованного технологического управления системами теплоснабжения, комплексная автоматизация тепловых пунктов с выведением основных параметров на диспетчерские пункты;
- диспетчеризация тепловых сетей и систем контроля теплопотребления;
- установка частотно-регулируемого электропривода насосов водоснабжения.

Внедрение таких мероприятий в жилищной сфере ведется по различным направлениям [4]: строительство многоквартирных домов в соответствии с требованиями энергетической эффективности; реализация мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении капитального ремонта многоквартирных домов; внедрение мероприятий по повышению энергетической эффективности систем освещения с установкой датчиков движения; внедрение автоматизированных тепловых пунктов; тепловая изоляция трубопроводов и повышение энергетической эффективности оборудования тепловых пунктов, трубопроводов отопления и горячего водоснабжения; проведение гидравлической регулировки распределительных систем отопления; внедрение частотного регулирования приводов насосов.

В каждой отрасли для оценки уровня энергосбережения и энергоэффективности на основе конкретных индикаторов формируются целевые показатели. Так, расчёт показателей энергоэффективности подпрограммы ЖКХ ведётся по следующим показателям:

- удельный расход топливно-энергетических ресурсов на выработку тепловой энергии (ТЭ) котельными;
- доля потерь в тепловых сетях;
- удельный расход электроэнергии (ЭЭ) на нежилые помещения в жилых домах;
- удельный расход тепловой энергии (ТЭ) в жилых домах;
- удельный расход ЭЭ, используемой при передаче ТЭ в системах теплоснабжения;

- удельный расход ЭЭ, используемой для передачи воды в системах водоснабжения;
- удельный расход воды в жилых домах.

Приоритетными направлениями финансирования мероприятий программы энергосбережения являются мероприятия за счет средств внебюджетных источников, в то время как бюджетные средства предусматриваются на софинансирование (субсидирование) проектов в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности для привлечения инвестиций. Объем финансирования программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» до 2020 г. составит 32 млрд руб., из них 50 % — внебюджетные средства (рис. 5). Доля муниципальных образований в общем объеме финансирования менее 1 %.

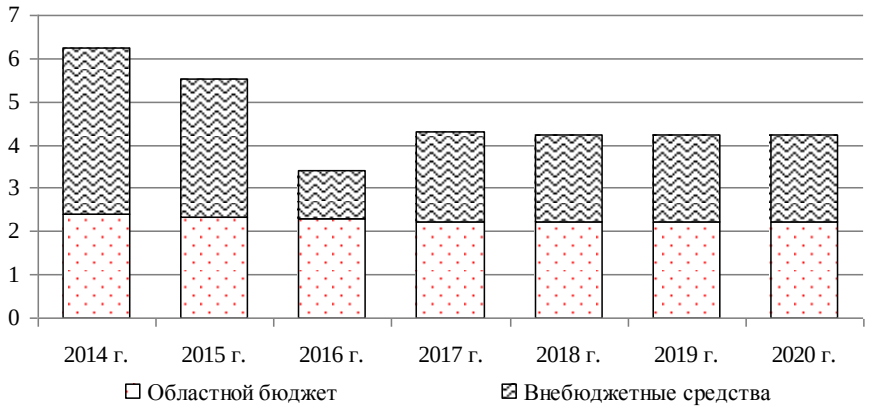


Рис. 5. Финансирование программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» Мурманской области, млрд руб.

Программа энергосбережения предусматривает первоочередное выполнение малозатратных и быстроокупаемых энергосберегающих мероприятий. Главной целью программы является снижение расходов бюджета на энергоснабжение муниципальных зданий за счет рационального использования всех энергетических ресурсов и повышения эффективности их использования.

Одним из основных направлений развития технического, экономического и экологического регулирования энергосберегающей политики является внедрение принципа наилучших доступных технологий. В результате мониторинга мер государственной политики по энергосбережению, реализуемых в Мурманской области, определены показатели внедрения наилучших доступных энергосберегающих технологий и объем их реализации в регионе (табл.). Основная задача мониторинга — определить соответствие реализации наилучших доступных технологий (НТД) в регионе ключевым направлениям государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Мониторинг внедрения энергосберегающих мероприятий показал, что в сфере жилищно-коммунального хозяйства области имеется значительный потенциал энергосбережения. В регионе проводится работа по обеспечению соответствия региональной политики ключевым направлениям государственной политики — в отраслевые государственные программы включены удельные показатели энергоэффективности, внедряются энергетические декларации, разрабатываются требования к энергоэффективности при капитальном ремонте

многоквартирных домов. Для реализации имеющегося потенциала энергоэффективности необходимо разработать механизмы привлечения внебюджетного финансирования в рамках энергосервисных контрактов для внедрения наилучших доступных технологий в жилищно-коммунальном секторе и бюджетных организациях.

Таблица

Показатели внедрения НТД в Мурманской области [5]

Показатель	Объем внедрения, %
Доля светоточек, использующих современные источники света со светоотдачей не менее 80 лм/Вт	62
Доля светоточек, работающих в составе осветительных систем с АСУ	56
Доля многоквартирных домов с приборами учета тепла	51
Доля бюджетных учреждений с приборами учета тепла	68
Доля внедрения автоматических индивидуальных тепловых пунктов в многоквартирных домах	4
Доля внедрения автоматических индивидуальных тепловых пунктов в бюджетных учреждениях	13

Процесс формирования программы энергосбережения имеет несколько ключевых моментов, определяющих программу структурно: цели, задачи программы, особенности территории региона, история формирования энергетической инфраструктуры территории, ее проблематика и стратегические задачи. Разработка программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности выполняется по следующим направлениям.

1. Сбор исходных данных, определение формата программы.

2. Составление топливно-энергетического баланса региона, определение потенциалов и резервов энергосбережения в разных секторах экономики.

Существует две основные группы (рис. 6) потенциалов энергосбережения:

- снижение объема используемых невозобновляемых видов топлива за счет повышения доли возобновляемых видов энергии в общем балансе;
- повышение эффективности используемых невозобновляемых видов топлива за счет применения энергосберегающих технологий и различных мероприятий.

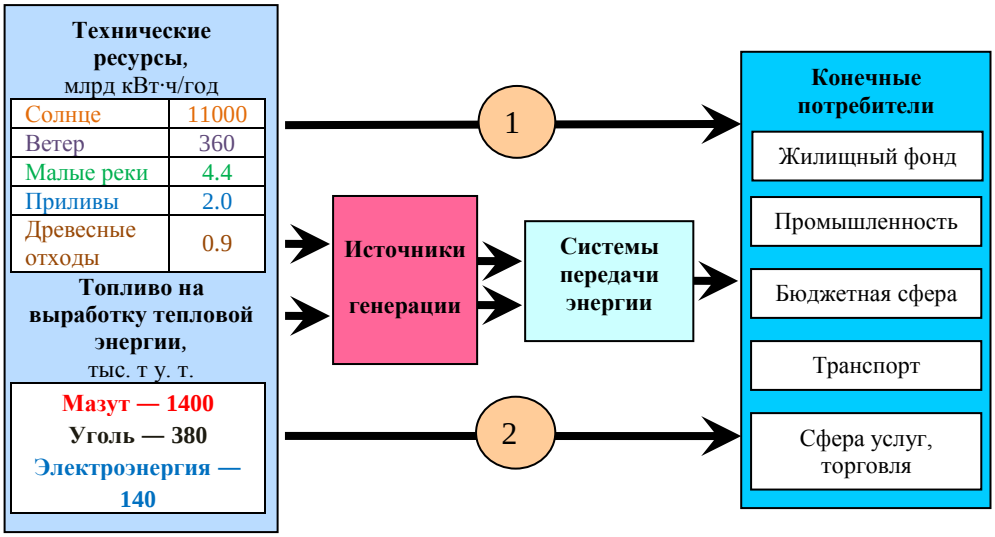


Рис. 6. Направления потенциалов энергосбережения Мурманской области

В Мурманской области изменение структуры потребления топливно-энергетических ресурсов нацелено на увеличение загрузки мощностей Кольской АЭС и гидроэлектростанций с увеличением доли использования электрической энергии для нужд отопления. Применение электрокотельных позволит значительно улучшить экологическую ситуацию, снизить расход топливно-энергетических ресурсов на собственные нужды при выработке тепла. Наличие в ряде программ энергосбережения мероприятий по изменению топливного баланса путем перспективной разработки ШГКМ и использования добытого природного газа для нужд отопления Мурманской области в настоящее время не отвечает действительности, так как в 2013 г. было принято решение о переносе начала разработки газоконденсатного месторождения на 2025 г. Поэтому программы энергосбережения, включающие в себя мероприятия по использованию ресурсов ШГКМ, подлежат корректировке.

3. Выбор приоритетных направлений энергосбережения, формирование структуры программы.

Основным результатом третьего этапа разработки региональной программы энергосбережения является разработка концепции программы энергосбережения, т. е. формирование структуры программы на базе выбора приоритетных направлений и основных показателей энергосбережения и повышения энергоэффективности в регионе.

4. Подбор эффективных технических решений энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Формирование наиболее эффективного комплекса мер и мероприятий для региональных программ энергосбережения осуществляется путем решения двух основных задач:

- выбора технических и организационных решений (подходов) для поэтапной реализации потенциала и резервов энергосбережения, определенных на втором этапе;

- формирования благоприятной мотивационной среды для реализации подобранных технических мер (нормативно-правовое поле, экономические стимулы, запреты и др.).

Основным результатом четвертого этапа разработки региональной программы энергосбережения является выбор из всего комплекса мер наиболее эффективных и быстрореализуемых.

5. Выбор мотивирующих механизмов для реализации технических мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности.

Реализация ряда технических мероприятий, необходимых для развития энергосистемы региона и повышения уровня энергоэффективности, требует совершенствования нормативно-правового поля, создания благоприятной мотивационной среды и формирования различных стимулирующих механизмов:

- финансово-экономических;
- нормативно-правовой базы, регламентов и стандартов;
- информационно-пропагандистских мер;
- рычагов тарифного и иного стимулирования.

Полноценная и масштабная деятельность в сфере энергосбережения требует создания целой системы финансово-экономических механизмов, основанной на комплексном подходе к решению проблемы энергосбережения региона с учетом его особенностей. Структура таких механизмов зависит от особенностей региона и требует привлечения значительных инвестиций из разных источников финансирования.

Основными источниками реализации финансово-экономических механизмов в регионе являются:

- собственные средства потребителей энергоресурсов;
- кредитные средства в виде краткосрочных и долгосрочных кредитов и кредитных линий, лизинговых схем;
- амортизационная и инвестиционная составляющие тарифа;
- гранты фондов;
- бюджетная поддержка в виде софинансирования, субсидирования, льгот.

Внедрение финансово-экономических механизмов, направленное на использование в комплексе различных источников финансирования, должно сопровождаться повышением эффективности нормативно-правового поля энергосбережения региона.

Основным результатом пятого этапа разработки программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности является сформированная комплексная региональная программа энергосбережения с обязательным определением в зависимости от особенностей территории необходимых мотивационных механизмов.

6. Мониторинг программ энергосбережения и повышения энергоэффективности при их разработке и реализации.

Основным результатом шестого этапа является обеспечение в рамках региональной программы энергосбережения комплексного мониторинга, в первую очередь, показателей энергопотребления в регионе.

Выводы

1. Комплексная программа энергосбережения позволит определить потенциал энергосбережения в регионе, затраты на реализацию этого потенциала и экономию денежных средств, осуществлять комплексный мониторинг энергопотребления в регионе.

2. Реализация мероприятий программы будет способствовать устойчивому обеспечению экономики и населения топливом и энергией, сокращению удельного потребления топливно-энергетических ресурсов в организациях бюджетной сферы и других секторах экономики, росту конкурентоспособности, энергетической и экологической безопасности.

Литература

1. Клюкин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Повышение эффективности использования энергоресурсов в Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. № 5 (39), вып. 13. Спецвыпуск. С. 107–118.
2. Актуализация на 2017 год Схемы теплоснабжения муниципального образования город Мурманск с 2014 по 2029 годы. Сводный том изменений. Т. 13. СПб., 2016. 21 с.
3. Бежан А. В., Минин В. А. Математическое описание работы котельной совместно с ветроэнергетической установкой и тепловым аккумулятором // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 20–25.
4. Повышение энергетической эффективности в региональной энергетике Мурманской области // Сборник статей по материалам «ENES-2014» / отв. ред. Н. М.Кузнецов. М.: Перо, 2015. 40 с.
5. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2014 г. М., 2014. 139 с.

Сведения об авторах

Кузнецов Николай Матвеевич,
ведущий научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 21А
Эл. почта: kuzn55@mail.ru

Клюкин Александр Михайлович,
заместитель директора Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 21А
Эл. почта: kluk@ien.kolasc.net.ru

Трибуналов Сергей Николаевич,
инженер I категории лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, Академгородок, д. 21А
Эл. почта: ser@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.311

В. В. Ярошевич, А. С. Карпов, Г. П. Фастий, И. С. Шиханов

АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЧАСТКА СЕТИ

Аннотация

Современные электрические сети по своей структуре, организации эксплуатации и принципам управления относятся к сложным техническим комплексам (системам). При принятии решений на управление такой системой важными являются оценки качества её функционирования. Разработана методика оценки качества функционирования электрических сетей при комплексном учете условий работы.

Ключевые слова:

надежность, экономичность, безопасность, живучесть, аудит энергоэффективности, потребители.

V. V. Yaroshevich, A. S. Karpov, G. P. Fastiy, I. S. Shikhanov

ALGORITHM OF POWER SYSTEM SECTION EFFICIENCY INVESTIGATION

Abstract

Modern electric networks, in their structure, operation organization and management principles, can be treated as integrated technical systems. Choosing the way of such system management demands assessing its performance. We have developed a method of electric networks performance estimation taking into account the integrated operation conditions.

Keywords:

reliability, profitability, safety, survivability, energy efficiency audit, consumers.

Многолетний опыт по обследованию и анализу распределительных сетей различных объектов Северо-Запада, накопленный Центром физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН, показал, что системы электроснабжения городских и промышленных потребителей состоят из разветвленных закольцованных систем с большим количеством трансформаторных подстанций, связь между которыми осуществляется кабельными и воздушными линиями, со значительным сроком эксплуатации, достигающим 30–40 и более лет [1].

В таких сложных и разветвленных схемах трудно обеспечить нормальное функционирование электрических сетей в установившихся режимах [2]. Неизбежны также аварийные ситуации, обусловленные старением изоляции кабелей, износом электрооборудования, ошибками технического персонала при многократных оперативных переключениях и другими разнообразными причинами. Предотвращение развития аварийных ситуаций в значительной степени связано с надежным срабатыванием коммутационного электрооборудования при локализации поврежденных участков сети [3, 4].

Существующие методы оценки функционирования и электромагнитной совместимости различного электрооборудования ориентированы в основном на электрические сети высокого напряжения. В то же время специфика процессов в системах электроснабжения среднего и низкого напряжения с разветвленной сетевой структурой недостаточно подробно изучена.

По результатам обследования многочисленных объектов промышленности с различными потребителями был разработан алгоритм решения данной проблемы при комплексном учете условий работы разнородных электроприемников и схемообразующих разветвленных электрических сетей. Было проведено мониторинговое обследование схем электроснабжения 6, 10 и 0.4 кВ ряда действующих объектов техносферы Мурманской области

(муниципальные электрические сети городов Апатиты, Мончегорск, Ковдор, поселков Ловозеро, Ревда и др.) Были получены данные о реальных условиях эксплуатации электрооборудования, показателях качества электроэнергии и определены источники опасных электромагнитных воздействий [5].

Были рассмотрены и учтены особенности анализируемых распределительных сетей (35–6/10–0.4 кВ), расположенных в условиях Крайнего Севера и Арктики:

- разнородная плотность электрических нагрузок;
- значительный срок эксплуатации, достигающий 30–40 и более лет;
- большинство потребителей получают некачественную электроэнергию, как показали результаты мониторинговых регистраций;
- несимметрия фазных напряжений;
- завышенные потери электроэнергии.

Следует отметить, что указанные особенности характерны не только для северных регионов России. Они актуальны, как правило, вне мегаполисов, ведь в крупных городах пришлось модернизировать сети из-за быстро растущей нагрузки.

Оценка качества функционирования электрической сети отличается значительной трудоёмкостью и предполагает детальную информацию о характеристиках различных процессов в элементах сетей.

Под качеством (эффективностью) сложной системы понимается совокупность свойств, определяющих способность системы выполнить поставленные при её создании задачи. К определяющим качество свойствам технической системы наиболее часто относят надёжность, экономичность и безопасность, а при определённых требованиях к системе также живучесть (рис. 1) [6].

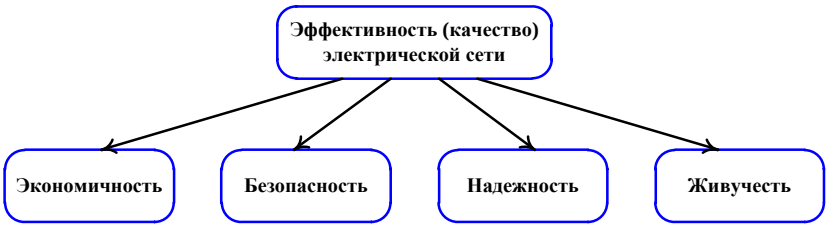


Рис. 1. Свойства, определяющие эффективность (качество) электрической сети

Основной задачей электрической сети является бесперебойное снабжение электрической энергией потребителей. Поэтому качество работы электрической сети, прежде всего, следует оценивать надежностью электроснабжения потребителей, например, вероятностью того, что будет обеспечено непрерывное снабжение потребителей энергией требуемого качества.

Другим важным свойством, определяющим качество функционирования технического комплекса, является экономичность, которая характеризуется показателями использования средств, вкладываемых в электрическую сеть. Такими показателями экономичности могут быть себестоимость оказываемых услуг по передаче единицы энергии, прибыль, рентабельность и другие, а для оценки решений по развитию электрической сети — чистый дисконтированный доход, индекс доходности, внутренняя норма доходности и другие.

В последнее время всё большую значимость приобретает свойство безопасности технических систем. В проблеме безопасности сложных технических комплексов следует выделить два направления. Первое из них относится к их нормальной повседневной эксплуатации. Неизбежные техногенные воздействия на человека и природную среду, а также отходы производства выдвигают ряд практических задач по охране труда и экологичности используемых технологий.

Второе направление связано с технологическими нарушениями и называется «промышленная безопасность». Под промышленной безопасностью технического объекта (системы) понимается его способность обеспечить защиту человека, природной среды и собственности от опасных воздействий, возникающих при авариях и инцидентах на этом объекте [1].

Оценки надёжности, экономичности и безопасности дают достаточно полное представление о качестве (эффективности) функционирования технического объекта (системы) в определённых условиях эксплуатации — нормальных условиях. Однако при эксплуатации электрической сети, хотя и редко, возможны опасные воздействия на ее элементы [4], не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации и приводящие к чрезвычайным ситуациям. В качестве примера можно привести известные случаи массового повреждения воздушных линий электропередачи на обширной территории из-за воздействий гололёдно-ветровых нагрузок на провода и конструкции опор, превосходящих проектные.

Показатели живучести имеют вероятностный характер и отражают риск возникновения чрезвычайной ситуации, оценки времени восстановления и другие. В электроэнергетике имеет место понятие живучести объекта в узком смысле — свойство объекта противостоять возмущениям, например, как в [7], не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей на длительное время.

Для определения эффективности функционирования высоковольтной электрической сети необходимо комплексное технико-экономическое её обследование. С этой целью и проводят энергоаудит. Серьёзный энергоаудит — это большая и трудоёмкая работа. Для более организованного и плодотворного его проведения разработан алгоритм (рис. 2.).

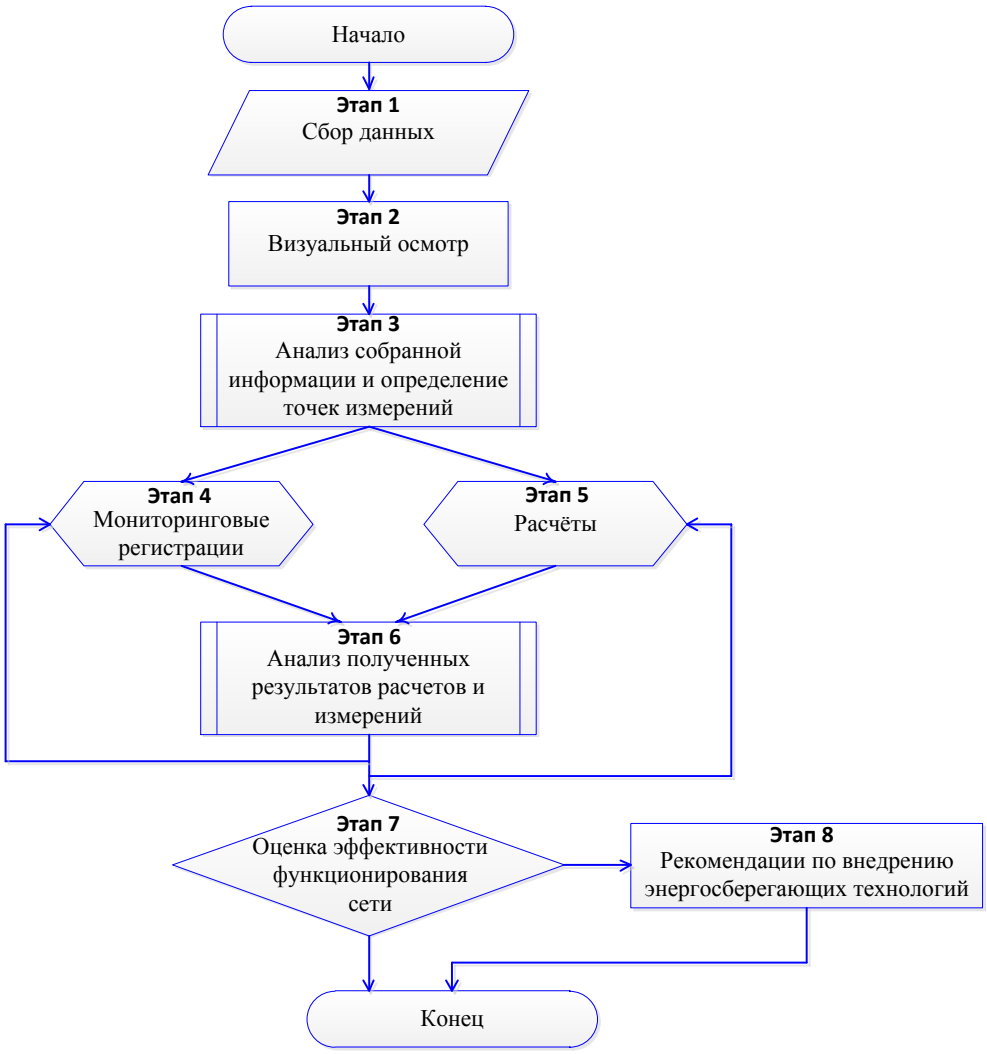


Рис. 2. Алгоритм проведения комплексного обследования электроэнергетических сетей с целью определения эффективности её функционирования

Организацию и проведение работ по комплексной оценке электроэнергетической сети можно разделить на несколько основных этапов.

Этап 1. Сбор и ознакомление с проектной и отчетной документацией для определения структуры сети.

Этап 2. Проведение визуального осмотра системы электроснабжения с целью выявления особых условий её эксплуатации.

Этап 3. Анализ схем, оборудования, электропотребления (построение суточных осенне-зимних и весенне-летних графиков нагрузки, годового графика потребления активной и реактивной энергии) для выявления «сильных» и «слабых» мест сети и выбора точек предполагаемых измерений.

Этап 4. Проведение мониторинговых регистраций. Контролируемые параметры: напряжение, ток, сопротивление, частота, активная и реактивная мощность, показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

Этап 5. Проведение необходимых расчётов: удельного электропотребления, уровня загрузки трансформаторов и кабелей, показателей графиков нагрузок, токов замыкания на землю, нормальных и аварийных режимов, потерь в элементах системы электроснабжения (линиях и трансформаторах) [8].

Этап 6. Анализ результатов выполненных измерений и проведенных расчетов.

Этап 7. Оценка эффективности функционирования сети (экономичность, безопасность, надежность, живучесть).

Этап 8 (при необходимости). Рекомендации по внедрению энергосберегающих технологий.

Разработанный алгоритм — это большая работа с длительными регистрациями, масштабными объемами статистической информации со средств учета, а также с комплексными расчётами различных режимов работы сети. По опыту проведенных исследований можно констатировать: чтобы получить достоверную картину об эффективности работы сети, необходимо не менее одного года работы. По временным затратам основными будут регистрации параметров сети в различное время года с учетом годового (сезонного) графика нагрузок присоединенных потребителей. Лишь после получения полной картины о работе участка сети можно приступать к внедрению энергоэффективных технологий. В противном случае дорогостоящая модернизация не принесет ожидаемого результата, а может даже усугубить работу участка в целом.

Литература

1. Анализ результатов мониторинговой регистрации показателей качества электроэнергии / Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич, А. С. Карпов // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17, № 1. С. 67–76.

2. Карпов А. С., Ярошевич В. В., Юшков М. Г. Обоснование технического решения для разработки программно-аппаратного комплекса, способного локализовать источники искажения электроэнергии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 4. С. 102–106.

3. Соснина Е. Н., Бедретдинов Р. Ш. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25–28.

4. Соснина Е. Н., Бедретдинов Р. Ш. Моделирование системы электроснабжения с питанием группы потребителей от трансформатора с тиристорным регулятором напряжения и мощности // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 5 (1). С. 224–230.

5. Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П., Ярошевич В. В. Исследование возможности локализации источника гармонических искажений напряжения на питающих подстанциях // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети: сб. науч. тр. Апатиты, 2008. С. 140–147.

6. Скопинцев В. А., Чемоданов В. И., Чичинский М. И. Оценка надежности работы электрической сети // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2012. № 6. С. 48–65.

7. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П. Результаты экспериментальных регистраций грозовой активности на Кольском полуострове // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18, № 4. С. 680–689.

8. Ярошевич В. В., Шиханов И. С., Карпов А. С. Применение среды LabView для решения проблем электромагнитной совместимости // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-технич. ст. Нижний Новгород: НГТУ, 2016. С. 183–188.

Сведения об авторах

Ярошевич Вера Васильевна,
научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра Физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: yaroshevich@ien.kolasc.net.ru

Карпов Алексей Сергеевич,
старший научный сотрудник лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра Физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: asc_apatity@mail.ru

Фастий Галина Прохоровна,
научный сотрудник лаборатории высоковольтной электроэнергетики и технологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,
Эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Шиханов Иван Сергеевич,
инженер-исследователь лаборатории электроэнергетики и электротехнологии
Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: shikhanovPhD@yandex.ru

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.548 (470.21)

В. А. Минин, А. А. Рожкова

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Аннотация

Рассмотрен вопрос о возможном участии ветроэнергетических установок (ВЭУ) в электроснабжении небольших рассредоточенных потребителей Мурманской области, расположенных в районах с повышенным потенциалом энергии ветра. Выполнена технико-экономическая оценка перспектив возможного участия ВЭУ в покрытии графика электрической нагрузки местных дизельных электростанций.

Ключевые слова:

Мурманская область, автономные потребители энергии, дизельные электростанции, ветроэнергетические установки, технико-экономическая оценка.

V. A. Minin, A. A. Rozhkova

THE ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF WIND TURBINES ADOPTION INTO DIESEL POWER PLANTS IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract

The article deals with the problem of wind turbines possible engagement in electric power supply of widely distributed small Murmansk Region customers, which are located in the high wind energy capacity districts. Techno economic assessment of the prospects of wind turbines possible engagement in the local diesel power plants annual schedule commitment, has been made.

Keywords:

Murmansk Region, independent electric power consumers, diesel power plants, wind turbines, techno economic assessment.

В прибрежных районах Арктической зоны РФ имеется много относительно небольших населенных пунктов, таких как метеостанции, маяки, пограничные заставы, места базирования рыбаков и оленеводов, объекты специального назначения. Необходимость в их функционировании сохраняется на далекую перспективу. Удаленность и разобщенность перечисленных малых потребителей вносят затруднения во все сферы их хозяйственной деятельности. В значительной мере это сказывается и на организации энергоснабжения.

Способы доставки топлива потребителям Севера весьма разнообразны. Анализ обширной информации, собранной по Мурманской области, позволил установить, что стоимость топлива при его дальней перевозке автотранспортом возрастает в 1.2–1.3 раза. При использовании водного морского транспорта — в 1.3–1.5 раза, бездорожного — в 1.5–2.0 раза и при использовании авиации — в 2.0–3.0 раза по сравнению с отпускной ценой на опорных пунктах топливоснабжения. При сложившихся в 2017 г. ценах на дизельное топливо в размере 40 руб. за литр стоимость его после доставки потребителю с учетом транспортных расходов может достигать 55–60 руб/л и более.

Высокая стоимость топлива оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели работы местных дизельных электростанций (ДЭС). Себестоимость вырабатываемой энергии достигает 20–25 руб/кВт·ч, что в 5–10 раз выше, чем при централизованном электроснабжении. Поэтому в удаленных населенных пунктах очень остро стоит вопрос об экономном использовании привозного дизельного топлива. Одним

из возможных направлений его экономии может быть использование местных возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра.

Потенциал ветра и предпосылки его использования. Западная часть Арктической зоны РФ располагает повышенным потенциалом ветровой энергии [1–3]. В качестве примера можно обратиться к Мурманской области, где наибольшая интенсивность ветра наблюдается в прибрежных районах. На побережье Баренцева моря среднегодовые скорости на высоте 10 м составляют 6–8 м/с, на побережье Белого моря — 5–6 м/с. В рассматриваемых районах имеет место существенная сезонная неравномерность интенсивности ветра (рис. 1), максимум скоростей ветра и, соответственно, максимум возможной выработки ветроэнергетических установок (ВЭУ) приходится на холодное время года. Он совпадает с сезонным максимумом потребности в энергии со стороны потребителей, и это является основной предпосылкой для участия ВЭУ в покрытии графика электрической нагрузки.

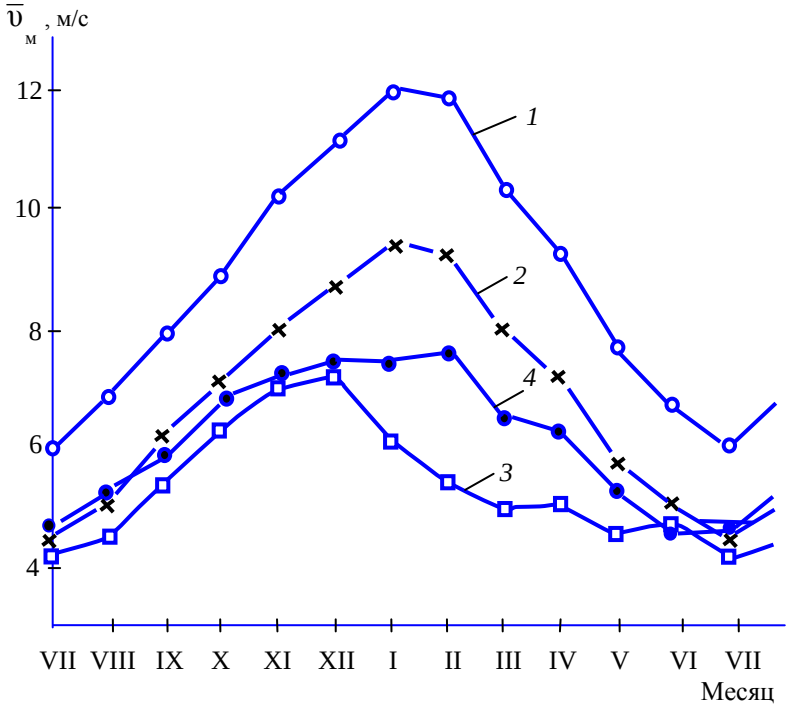


Рис. 1. Годовой ход среднемесячных скоростей ветра на островах (*1*) и побережье (*2*) Баренцева моря, побережье Белого моря (*3*) и на плато в Хибинских горах (*4*):
1 — метеостанция о. Харлов; *2* — Дальние Зеленцы; *3* — Чаваньга; *4* — Центральная

Показатели работы действующих ДЭС. В табл. 1 представлены некоторые типовые удаленные потребители, расположенные в прибрежной зоне Кольского полуострова, а на рис. 2. показано их местоположение в соответствии с порядковым номером. Из табл. 1 следует, что дизельные электростанции укомплектованы тремя–четырьмя дизель-генераторами. Такой состав генерирующего оборудования позволяет маневрировать мощностями, вовремя проводить их техническое обслуживание и плановый ремонт, иметь необходимый аварийный резерв. В представленных населенных пунктах число часов использования установленной мощности ДЭС находится на достаточно высоком уровне и составляет 2000–2500 ч.

Таблица 1

Показатели работы дизельных электростанций и режима ветра в прибрежных районах Кольского полуострова

№ п/п	Населенный пункт	Назначение*	Мощность ДЭС, кВт	Годовая выработка, тыс. кВт·ч	Число часов использования уст. мощности в году	Средняя годовая скорость ветра на высоте 10 м, м/с
1	Вайда	СФ	60+60+ +30+30=180	464	2580	6.9
2	Цып-Наволок	ПС	20+16+16=52	126	2420	7.1
3	Сеть-Наволок	СФ	30+30+ +30+30=120	248	2070	7.0
4	Кильдин Восточный	ПС	60+60+ +30+20=170	360	2120	7.5
5	о. Б. Олений	СФ	30+30+ 30+30=120	248	2070	8.4
6	о. Харлов	СФ	30+30+30=90	Н/д	н/д	8.4
7	Восточная Лица	ПС	16+16+12=44	110	2490	7.3
8	Корабельный	ПС	30+16+10=56	134	2390	6.2
9	Чапома	РК	120+120+ +120=360	440	1220	5.5
10	Чаваньга	РК	60+60+ +30=150	297	1980	5.5

*СФ — объект Северного флота; ПС — пограничная служба; РК — рыболовецкий колхоз.

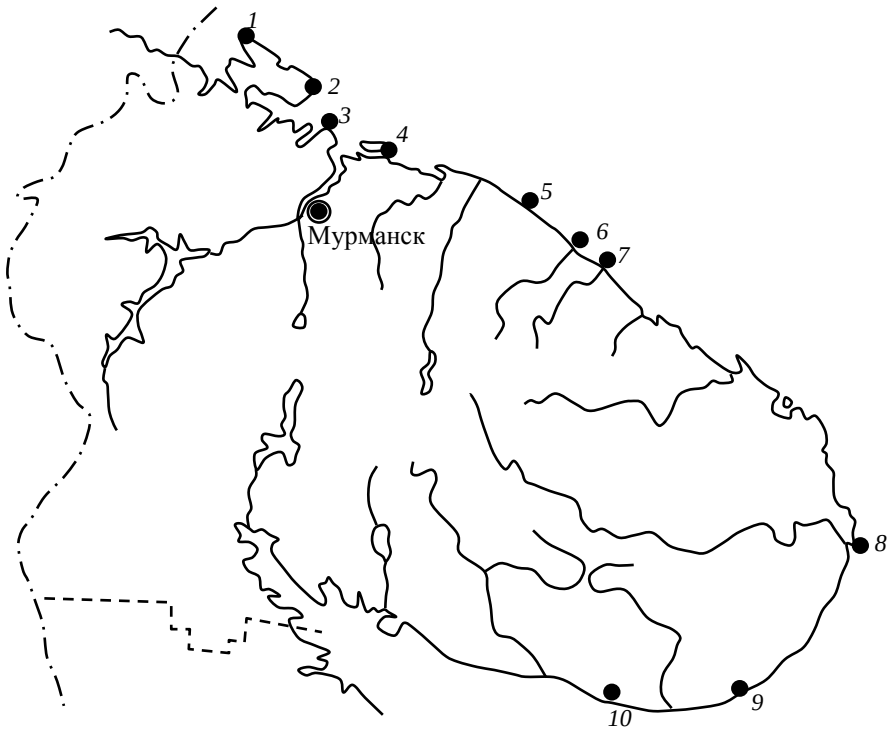


Рис. 2. Расположение удаленных прибрежных населенных пунктов Мурманской области (названия пунктов в табл. 1)

Выбор мощности ветроэнергетической установки для совместной работы с ДЭС. При выборе мощности следует учитывать, что ВЭУ не может работать в переменной части графика электрической нагрузки. Это означает, что установленная мощность ВЭУ должна быть не больше базовой нагрузки ДЭС. Как показал анализ работы ДЭС, перечисленных в табл. 1, годовой минимум нагрузки ДЭС составляет 20–30 % от годового максимума. Примерно такие же показатели приводятся и в работе [4] в разделе, где анализируются показатели работы сельских ДЭС. Следовательно, если предположить, что установленная мощность ДЭС составляет 180 кВт, как в н. п. Вайда (табл. 1), то можно ожидать, что годовой максимум нагрузки составит 150 кВт, а минимальная нагрузка около 30 кВт. Именно такой величины должна быть установленная мощность ВЭУ, чтобы не выходить за пределы базовой части графика нагрузки.

Оценка экономической эффективности совместной работы ВЭУ с действующей ДЭС. Такая оценка может быть выполнена посредством расчета срока окупаемости капитальных вложений в строительство ВЭУ. Рассмотрение данного вопроса можно продолжить применительно к той же ДЭС в н. п. Вайда. Сооружение ВЭУ является довольно затратным мероприятием. Согласно [5, 6] европейские цены на ветроустановки рассматриваемого мощностного класса составляют 1300–1400 евро/кВт. С учетом таможенных сборов, транспортных издержек по доставке, затрат на сооружение фундамента, производство монтажно-пусковых работ стоимость 1 кВт установленной мощности ВЭУ может быть принята на уровне 2000 евро/кВт. В этом случае, например, капиталовложения в немецкую ВЭУ SUDWIND N 1230 мощностью 30 кВт составят 60 тыс. евро, что при курсе 63 руб/евро (март 2017 г.) соответствует 3.78 млн руб.

Эффект от работы ВЭУ выражается в вытеснении электроэнергии, вырабатываемой ДЭС, и, соответственно, в экономии затрат на топливо. Удельный расход условного топлива на рассматриваемой ДЭС составляет около 400 г условного топлива на кВт·ч (КПД ДЭС 30 %). С учетом потерь топлива при транспортировке и хранении удельный расход условного топлива возрастет примерно на 5 %, до 420 г у. т/(кВт·ч), или при переходе на натуральное топливо — 294 г н. т/(кВт·ч).

Если ВЭУ SUDWIND N 1230 мощностью 30 кВт будет работать с числом часов использования установленной мощности в году 1000 ч, то выработка ВЭУ составит 30 тыс. кВт·ч. В свою очередь, дизельная электростанция при установленной мощности 180 кВт и числе часов ее использования в году 2500 ч выработала бы 450 тыс. кВт·ч. Доля выработки ВЭУ в общей выработке комплекса «ДЭС + ВЭС» в этом случае будет около 6.7 %, а годовой объем топлива, вытесненного ВЭУ, равен $(30 \cdot 10^3$ кВт·ч) · $(294 \cdot 10^{-6}$ т н. т/кВт·ч) = 8.82 т н. т.

В настоящее время на опорных пунктах топливоснабжения дизельное топливо стоит около 40 руб/л. При удельном весе дизтоплива 0.84 кг/л это соответствует 47.6 тыс. руб/т н. т. С учетом транспортных издержек и расходов на погрузочно-разгрузочные работы (зачастую в условиях отсутствия причальных сооружений с использованием маломерного флота) стоимость топлива может возрасти примерно на 40 %, т. е. до 67 тыс. руб/т н. т. В этом случае экономия затрат за счет годового объема топлива, вытесненного ВЭУ, составит 8.82 · 67 = 591 тыс. руб.

Экономия затрат на топливо от внедрения ВЭУ зависит от объема вытесняемой из графика нагрузки электроэнергии ДЭС. Поскольку в данном случае речь идет только о базовой части графика нагрузки, то максимальный объем этого вытеснения определится величиной 30 кВт · 8760 ч = 262.8 тыс. кВт·ч в год. На деле возможный объем вытеснения энергии ДЭС из графика нагрузки значительно меньше, так как ВЭУ не может беспрерывно работать на полную мощность круглый год — все 8760 ч. Практика и проведенные расчеты показывают, что в зависимости от потенциала ветра ВЭУ может работать с числом часов использования установленной мощности от 1000 до 4000. Указанный диапазон соответствует среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м от 3.2 до 7.2 м/с (рис. 3, табл. 2). С учетом вертикального профиля ветра на высоте оси ветроколеса рассматриваемой ВЭУ, составляющей 18 м, этот диапазон среднегодовых скоростей будет несколько выше — от 3.7 до 7.7 м/с.

Эффект от работы ВЭУ будет складываться из экономии затрат на топливо за вычетом расходов на обслуживание ВЭУ. Согласно данным, приведенным в европейском каталоге ветровых турбин [6], затраты на обслуживание ВЭУ мощностью 30 кВт составляют около 600 евро/год, или 38 тыс. руб/год. Тогда годовой эффект от работы ВЭУ совместно с ДЭС составит 591 – 38 = 553 тыс. руб. При стоимости ВЭУ 2000 евро/кВт и курсе 63 руб/евро капитальные вложения в ВЭУ составят 3780 тыс. руб. Из этого расклада следует, что капиталовложения окупятся за 3780 / 553 = 6.84 года.

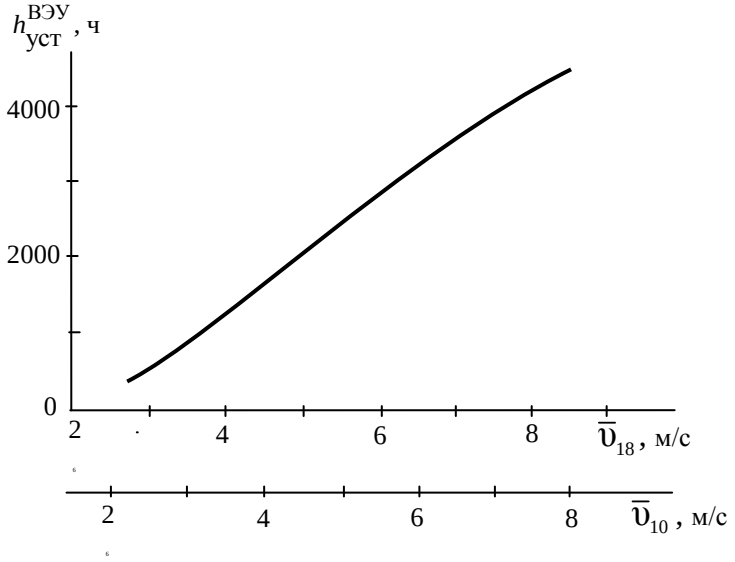


Рис. 3. Зависимость числа часов использования в году установленной мощности ВЭУ SUDWIND N1230 от среднегодовой скорости ветра на высоте расположения оси ветроколеса (18 м)

В таблице 2 для различных ветровых зон, соответствующих числу часов использования установленной мощности ВЭУ от 1000 до 4000 ч в год, приведены результаты расчетов технико-экономических показателей совместной работы ДЭС и ВЭУ. Из табл. 2 следует, что при среднегодовых скоростях ветра 4.4–7.2 м/с на высоте 10 м число часов использования установленной мощности ВЭУ SUDWIND N 1230 с расположением оси

ветроколеса на высоте 18 м может составлять 2000–4000. Доля ВЭУ в выработке энергии комплексом ДЭС + ВЭУ может достигать на побережье Белого моря 13–20 %, а на побережье и островах Баренцева моря — 20–26 % и более. Срок окупаемости капиталовложений в ВЭУ (табл. 2, рис. 4) составляет всего 1.6–3.3 года, что представляется крайне благоприятным.

Таблица 2

Технико-экономические показатели совместной работы ДЭС и ВЭУ

Показатель	Число часов использования установленной мощности ВЭУ в году			
	1000	2000	3000	4000
Среднегодовая скорость ветра, м/с				
на высоте 10 м	3.2	4.4	5.7	7.2
на высоте 18 м	3.7	4.9	6.2	7.7
Объем энергии, выработанной комплексом ДЭС + ВЭУ, тыс. кВт·ч	450	450	450	450
Энергия, выработанная ВЭУ, тыс. кВт·ч	30	60	90	120
Доля ВЭУ в выработке энергии комплексом ДЭС + ВЭУ, %	6.7	13.3	20.0	26.7
Объем топлива, вытесненного ВЭУ, т н. т/год	8.82	17.64	26.46	35.28
Экономия затрат на топливо, тыс. руб/год	591	1182	1773	2364
Расходы на обслуживание ВЭУ, тыс. руб/год	38	38	38	38
Эффект от работы ВЭУ, тыс. руб/год	553	1144	1735	2326
Капиталовложения в ВЭУ, тыс. руб.	3780	3780	3780	3780
Срок окупаемости ВЭУ, лет	6.84	3.30	2.18	1.63

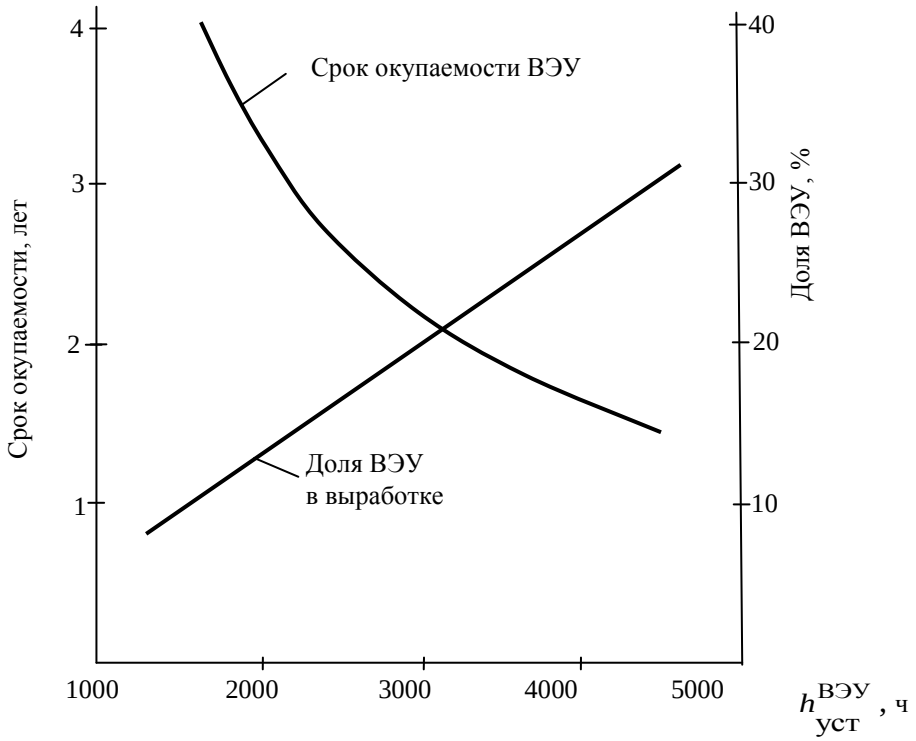


Рис. 4. Показатели работы комплекса ДЭС + ВЭУ в ветровых условиях побережья Кольского полуострова

Выводы

1. В небольших населенных пунктах Арктической зоны РФ, обеспечиваемых энергией от дизельных электростанций, стоимость топлива из-за больших транспортных расходов достигает 60–70 руб/т, а себестоимость вырабатываемой электроэнергии — 20–25 руб/(кВт·ч) и выше.

2. В районах с повышенным потенциалом ветра одним из направлений экономии дорогого топлива на ДЭС и снижения себестоимости электроэнергии может быть применение ВЭУ.

3. При выборе мощности ВЭУ для совместной работы с ДЭС следует учитывать, что ВЭУ не может работать в переменной части графика нагрузки, и ее мощность не должна превышать базовую нагрузку ДЭС, составляющую, как правило, около 20 % от максимальной.

4. Расчеты показателей совместной работы ДЭС установленной мощностью 180 кВт совместно с ВЭУ мощностью 30 кВт в ветровых условиях побережья Кольского полуострова (среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м 4.5–8.4 м/с) показали, что ВЭУ в состоянии вытеснить от 13 до 26 % выработки электроэнергии ДЭС, при этом срок окупаемости капиталовложений в ВЭУ не превышает 3.3 года. Полученные показатели свидетельствуют о высокой эффективности применения ВЭУ для совместной работы с ДЭС в Арктической зоне РФ в районах с повышенным потенциалом энергии ветра.

Литература

1. Зубарев В. В., Минин В. А. Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.
2. Минин В. А., Дмитриев Г. С., Минин И. В. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова // Изв. РАН. Энергетика. 2001. № 1. С. 45–53.
3. Энергия ветра — перспективный энергоресурс Мурманской области: препринт / В. А. Минин, Г. С. Дмитриев, Е. А. Иванова и др. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. 73 с.
4. Электротехнический справочник / под общ. ред. П. Г. Грудинского, Г. Н. Петрова, М. М. Соколова и др. 5-е изд. М.: Энергия, 1975. Т. 2. 752 с.
5. Безруких П. П. О стоимостных показателях энергетических установок на базе возобновляемых источников энергии // Энергетическая политика. 2009. № 5. С. 5–11.
6. Windenergie 2002. Osnabrueck – Deutschland, Bundesverband WindEnergie Service, GmbH, 2002. 264 s.

Сведения об авторах

Минин Валерий Андреевич,
заведующий лабораторией энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: minin@ien.kolasc.net.ru

Рожкова Анастасия Александровна,
младший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: nastasya_rozhkova@bk.ru

УДК 621.548 (470.21)

В. А. Минин, Г. В. Никифорова

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧАСТИЕМ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Аннотация

Оценен потенциал ветровой энергии Мурманской области и выявлены предпосылки использования ветра для теплоснабжения потребителей прибрежных районов Баренцева и Белого морей. Рассмотрен годовой график отопительной нагрузки потребителей, показано возможное участие котельной и ветроэнергетической установок в его покрытии. Показана целесообразность внедрения в схему теплоснабжения аккумуляторов теплоты, позволяющих запасать периодически возникающие избытки ветровой энергии и затем полезно использовать их в периоды провала ветра.

Ключевые слова:

Мурманская область, энергия ветра, теплоснабжение, котельная, ветроустановка, аккумуляторы тепловой энергии.

V. A. Minin, G. V. Nikiforova

PROSPECTS FOR THERMAL ENERGY ACCUMULATORS APPLICATION IN HEATING SYSTEMS INVOLVING WIND TURBINES

Abstract

We have estimated the potential of wind energy in the Murmansk Region and identified the premises for the use of wind for heat supply of consumers of the coastal strips of the Barents and White Seas. We have also considered annual schedule of the customers heating load, and have shown the possible commitment of the boiler and wind turbines in it. It is advisable to embed the thermal storages into heating circuit, which allow reserving cyclic wind over-generation for further effective usage during the low-load periods.

Keywords:

Murmansk Region, wind energy, heat supply, boiler, wind turbine, thermal energy storage.

В последние годы повсеместно ведутся исследования, направленные на вовлечение в топливно-энергетический баланс нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ), таких как энергия солнца, ветра, гидроэнергия малых рек, приливная энергия и др. Потенциальные возможности применения этих источников огромны. Их вовлечение в хозяйственный оборот — это путь к сокращению объемов использования органического топлива, энергосбережению и улучшению экологической обстановки вблизи потребителей энергии.

Использование возобновляемых источников энергии наиболее перспективно в районах, располагающих повышенным потенциалом этих источников и испытывающих недостаток в обычных традиционных топливных ресурсах. На Европейском Севере России к числу таковых относится Мурманская область, энергетика которой в значительной мере базируется на привозном органическом топливе.

Результаты обработки 20-летних рядов наблюдений за скоростью ветра по 37 метеорологическим станциям Кольского полуострова показали [1, 2], что среднегодовые скорости ветра в прибрежных районах Баренцева моря

достигают 7–8 м/с на высоте 10 м (рис. 1). На побережье Белого моря потенциал ветра несколько ниже — 5–6 м/с. Повсеместно в указанных районах имеет место явно выраженный зимний максимум скоростей ветра. Это является благоприятной предпосылкой для эффективного использования энергии ветра на нужды отопления.

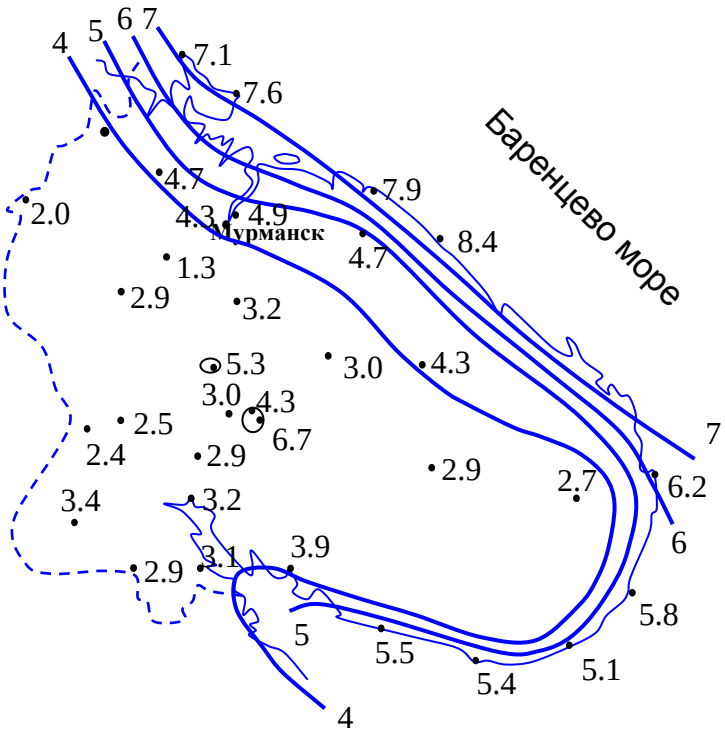


Рис. 1. Средние многолетние скорости ветра (м/с) на высоте 10 м от поверхности земли

Известно, что основным недостатком ветра является его непостоянство. Использование энергии ветра для теплоснабжения потребителей позволяет довольно успешно бороться с указанным недостатком. Кратковременные порывы ветра длительностью до нескольких минут легко сглаживаются за счет аккумулирующей способности теплоносителя, имеющегося в системе теплоснабжения. Более длительные порывы ветра (до нескольких часов) могут сглаживаться за счет аккумулирующей способности отапливаемых зданий и помещений. Однако анализ хронологического хода графика отопительной нагрузки, покрываемого, в первую очередь, ветроустановкой, а остальное за счет котельной, показал (рис. 2), что длительность периодов спада и подъема нагрузки может измеряться в сутках. Было установлено, что в периоды с активным ветром могут иметь место избытки ветровой энергии, которые при отсутствии специальных аккумулирующих устройств не могут быть использованы.

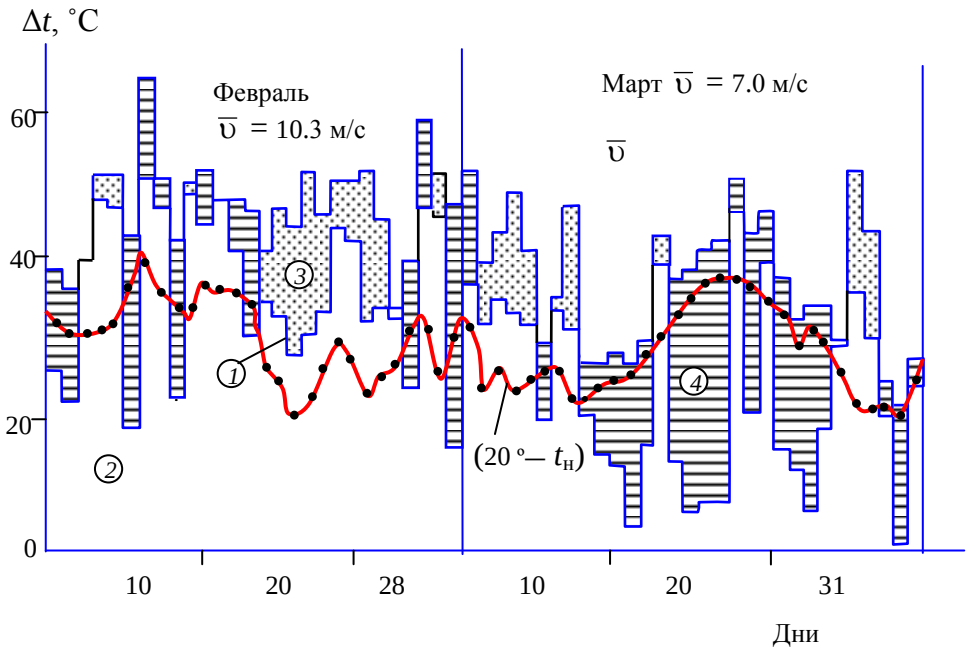


Рис. 2. Фрагмент хронологического хода участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки на полигоне КНЦ РАН на северном побережье Кольского полуострова:
1 — график тепловой нагрузки; *2* — полезно используемая энергия ВЭУ; *3* — избыточная энергия ВЭУ; *4* — энергия, вырабатываемая котельной

Для более полного использования ветровой энергии целесообразно применение аккумулирующих устройств, например емкостей с горячей водой, в которых может накапливаться запас тепловой энергии и далее расходоваться в периоды со слабым ветром. Зарубежный опыт организации систем теплоснабжения свидетельствует о широком применении тепловых аккумуляторов. Обычно они представляют собой емкости, заполненные водой. Имеются решения, в которых в качестве теплоносителя используется машинное масло. Находят применение схемы, в которых для увеличения теплоемкости аккумулирующих устройств в состав последних включаются элементы аккумуляторов фазового перехода (АФП), использующие теплоту плавления некоторых веществ, например кристаллогидратов солей. Такая «начинка» позволяет существенно снизить объемы аккумулирующих емкостей и улучшить показатели работы системы.

Не останавливаясь на особенностях конструктивного исполнения аккумуляторов теплоты, перейдем к оценке эффективности их применения в системах с участием ВЭУ. При рассмотрении этого вопроса в качестве основы были взяты данные непрерывных наблюдений за скоростью ветра и температуры наружного воздуха на ветроэнергетическом полигоне Центра физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН на побережье Баренцева моря в пос. Дальние Зеленцы. Эти данные можно считать представительными для всего северного побережья Кольского полуострова. На основании их были построены: график потребности потребителей в тепловой

энергии с учетом ветра (график отопительной нагрузки), график выработки энергии ВЭУ и график возможной работы котельной, дополняющей работу ВЭУ в периоды со слабым ветром. Такие построения представлены на рис. 3. Установленные мощности котельной и ВЭУ взяты одинаковыми (β^T = 1), равными максимальной тепловой нагрузке в период самой холодной пятидневки (в данном случае 7–11 февраля.). На этом же рисунке показана возможная работа теплового аккумулятора. Емкость аккумулятора принята равной 2-суточному расходу теплоты при работе потребителя с максимальной нагрузкой. Аккумулятор работает за счет изменения температуры теплоносителя (воды) в диапазоне от 50 до 90 °С.

Режим работы аккумулятора предполагался следующим. В исходном незаряженном состоянии температура теплоносителя в аккумуляторе $\tau_{ак}$ = 50 °С. Если поступление теплоты за счет работы ВЭУ превысит текущий расход тепла на отопление, то будет происходить заряд аккумулятора, температура воды в нем повысится (50 ºС < $\tau_{ак}$ < 90 ºС). Если поступление энергии от ВЭУ станет недостаточным для покрытия графика нагрузки, часть энергии будет заимствоваться из аккумулятора. При полном разряде аккумулятора ($\tau_{ак}$ < 50 °С) и наступлении дефицита теплоты, показателем чего может быть снижение температуры внутри помещения ниже предельного уровня ($t_{вн}$ < 20 °С), в работу включится котельная. В целях экономии топлива и максимального использования энергии ветра систему теплоснабжения можно настроить так, чтобы котельная работала совместно с ВЭУ до создания только полусуточного (а не полного 2-суточного) запаса теплоты в аккумуляторе ($\tau_{ак}$ = 60 °С). После этого котельная отключается и отопление ведется за счет ВЭУ и аккумулятора. Теперь вновь при избытке поступления энергии от ВЭУ она будет запасаться в аккумуляторе вплоть до 2-суточного запаса ($\tau_{ак}$ = 90 °С), а при недостатке заимствоваться из аккумулятора вплоть до его полного разряда ($\tau_{ак}$ = 50 °С) и включения резерва (при $t_{вн}$ < 20 °С).

Анализ графиков рис. 3 показывает, что при длительных периодах активных ветров и при низкой отопительной нагрузке могут иметь место случаи, когда при полном заряде теплового аккумулятора избыток энергии от ВЭУ не может быть использован. В этом случае будет наблюдаться частичный перегрев зданий и потребуется остановка ВЭУ на некоторый период.

Применение теплового аккумулятора по рассмотренной схеме позволяет более полно использовать ветровую энергию, значительно сократить время работы котельной и увеличить тем самым экономию топлива. Конкретные цифры, характеризующие положительный эффект от применения теплового аккумулятора, представлены в таблице, из которой видно, что благодаря аккумулированию участие ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки возрастает на 5–12 % в зимние месяцы и на 23–29 % — в летние. В отдельные периоды вся нагрузка покрывается только за счет ВЭУ. Существенно изменяется такой показатель, как число дней, в которые требуется включение котельной. При работе без аккумулятора котельную необходимо включать в работу в среднем каждый второй день (13–20 раз в месяц и 170 раз в год). Наличие аккумулятора позволяет обращаться к котельной только 1–6 раз в месяц и около 20 раз в год, т. е. в 5–8 раз реже.

Таблица

Влияние аккумулятора теплоты на полноту участия ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки в условиях северного побережья Кольского полуострова (пос. Дальние Зеленцы)

Параметр	Месяц												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Средняя скорость ветра, м/с	8.8	10.3	7.0	8.5	6.1	5.9	4.6	5.0	5.4	9.3	8.7	8.9	7.4
Средняя температура наружного воздуха, ºС	-11.0	-9.9	-7.2	-5.1	1.7	3.6	8.2	9.9	6.5	0.3	-3.7	-9.4	-1.3
Доля участия ВЭУ, %													
при работе без аккумулятора теплоты	71.2	85.0	65.0	88.5	74.0	76.5	65.7	73.8	70.8	90.8	84.0	82.5	78.5
с аккумулятором	80.2	90.6	77.3	97.9	97.3	100	92.1	100	100	100	96.1	87.2	91.3
Количество дней с включением котельной													
при работе без аккумулятора теплоты	23	12	21	12	18	13	20	13	13	5	13	18	171
с аккумулятором	6	3	5	1	1	–	1	–	–	–	1	4	22

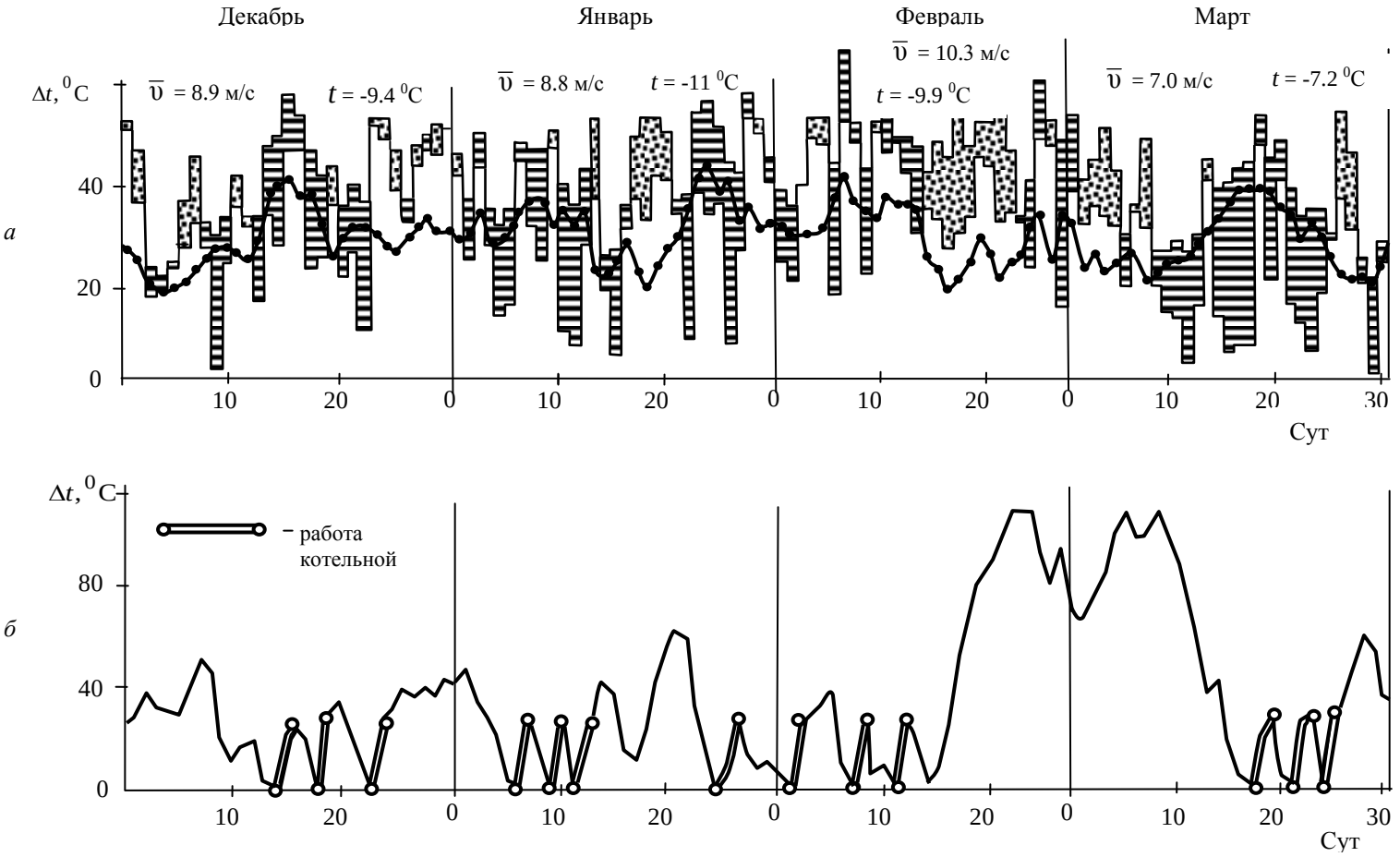


Рис. 3. Участие ВЭУ в покрытии графика отопительной нагрузки (*а*) и возможная работа теплового аккумулятора (*б*)

Выводы

1. Прибрежные районы Кольского полуострова располагают повышенным потенциалом энергии ветра: среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют 5–8 м/с.

2. В указанных районах имеет место явно выраженный зимний максимум скоростей ветра, что является благоприятной предпосылкой для эффективного использования энергии ветра на нужды отопления.

3. При включении ВЭУ в систему теплоснабжения кратковременные порывы ветра (до нескольких минут) сглаживаются за счет аккумулирующей способности теплоносителя, более продолжительные колебания (до нескольких часов) могут сглаживаться за счет аккумулирующей способности отапливаемых зданий и помещений.

4. Для использования избытков ветровой энергии, возникающих в периоды с сильным ветром или в периоды снижения отопительной нагрузки, целесообразно применение аккумуляторов тепловой энергии.

5. Аккумулирование и последующее использование периодически возникающих избытков ветровой энергии позволяет сократить время работы основного источника (котельной), увеличить экономию органического топлива, сократить эксплуатационные расходы.

Литература

1. Энергия ветра — перспективный возобновляемый энергоресурс Мурманской области: препринт / В. А. Минин, Г. С. Дмитриев, Е. А. Иванова, Г. В. Никифорова, А. В. Бежан. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. 73 с.
2. Минин В. А. Ресурсы нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Мурманской области и приоритеты их использования // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 1. С. 94–101.

Сведения об авторах

Минин Валерий Андреевич,
заведующий лабораторией энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к. т. н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: minin@ien.kolasc.net.ru

Никифорова Галина Викторовна,
младший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
Эл. почта: nikiforova@ien.kolasc.net.ru

УДК 697.3:620.92+621.548

А. В. Бежан

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОМ, СОСТОЯЩИМ ИЗ КОТЕЛЬНОЙ, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ И ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА

Аннотация

Представлены результаты разработки алгоритма управления энергокомплексом «котельная + ветроэнергетическая установка + тепловой аккумулятор», главной задачей которого является обеспечение баланса вырабатываемой и потребляемой мощности. Подробно рассмотрен каждый элемент представленного алгоритма.

Ключевые слова:

возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, алгоритм управления, энергокомплекс, теплоснабжение, котельная, тепловой аккумулятор.

A. V. Bezhan

DEVELOPMENT OF ALGORITHM OF BOILER, WIND TURBINE AND HEAT ACCUMULATOR ENERGY COMPLEX CONTROL

Abstract

The results of development of algorithm of control of “boiler house + wind-driven power plant + heat accumulator” energy complex are presented. Its main task is to set the balance between generated and consumed powers. The article gives a detailed description of each algorithm element.

Keywords:

renewable energy sources, wind-driven power plant, control algorithm, power complex, heat supply, boiler, heat accumulator.

В районах с высоким потенциалом ветра и продолжительным отопительным сезоном теплоснабжение может осуществляться от комбинированной системы отопления, включающей в себя котельную и ветроэнергетическую установку (ВЭУ) [1].

Использование энергии ветра для генерации тепловой энергии связано с некоторыми сложностями, обусловленными главным образом тем, что скорость ветра является непостоянной величиной и в большинстве случаев носит случайный характер. В результате этого выдаваемая мощность ВЭУ, как правило, не совпадает с потребностями потребителя. Чаще всего она может быть больше или меньше требуемого уровня. Таким образом, в периоды с сильным ветром могут возникать избытки энергии, вырабатываемой ВЭУ, а в холодную маловетреную погоду мощности, выдаваемой от ВЭУ, может не хватать на покрытие графика отопительной нагрузки. Поэтому в состав энергокомплекса «котельная + ВЭУ» целесообразно включить тепловой аккумулятор (ТА), который способен накапливать в себе избытки тепловой энергии, а потом по мере необходимости расходовать их, дополняя работу ВЭУ.

На рисунке 1 представлен общий вид системы теплоснабжения от энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА», которая включает в себя следующие основные структурные элементы: здание (потребитель тепловой энергии), котельная (основной источник тепла), ВЭУ (дополнительный источник тепловой энергии), тепловой аккумулятор (ёмкость для накопления и хранения тепловой энергии в виде горячей воды), разделитель и смеситель (вспомогательное оборудование), элеватор (устройство для понижения температуры горячей воды и создания требуемого гидравлического напора в системе отопления) [2].

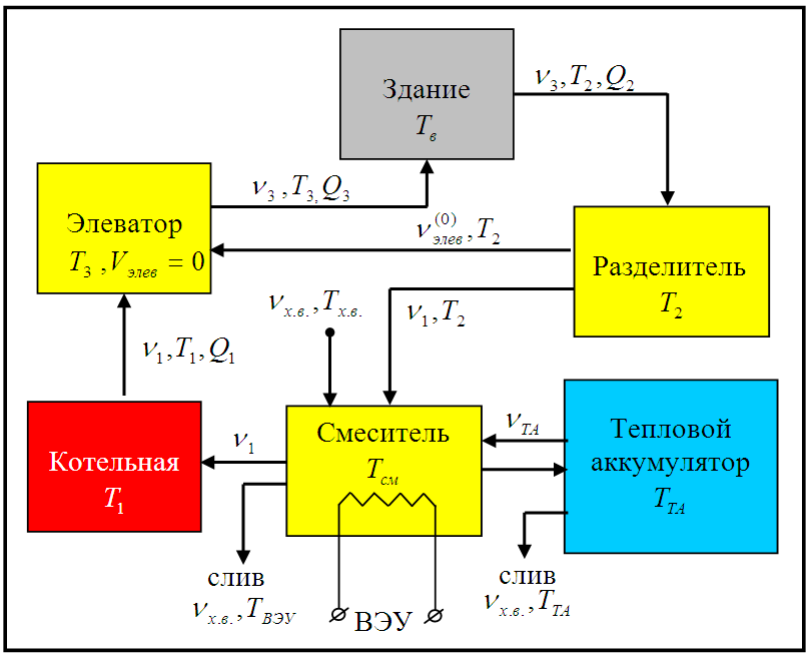


Рис. 1. Структурная схема системы теплоснабжения от энергокомплекса «котельная + ВЭУ + тепловой аккумулятор»:
ν и T — соответственно расход и температура теплоносителя; Q — количество тепловой энергии, содержащейся в теплоносителе

Для создания подобной комбинированной системы теплоснабжения требуется разработка специального блока управления, который должен управлять всеми источниками тепловой энергии в соответствии с наиболее оптимальными режимами функционирования каждого узла системы с целью обеспечения качественного и бесперебойного теплоснабжения потребителей. Устройство управления системой должно обеспечивать алгоритмы управления перетоками мощности и выполнять функции защиты от перегрузки. Элементы алгоритма управления перетоками являются ключевым звеном в обеспечении корректного функционирования системы теплоснабжения от энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА» и её энергоэффективности.

В представленном на рис. 1 варианте работа энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА» выглядит следующим образом: при избытке генерируемой ВЭУ энергии по сравнению с потреблением происходит заряд ТА, при дефиците — разряд. При этом ТА считается заряженным полностью, если максимальная температура воды ТА составляет 95 °С. Такая температура не допускает закипания воды и разрушения аккумулятора. Котельная включается в работу при условии, что ТА разряжен и имеется дефицит тепловой мощности. При избытке мощности и заряженном ТА избыток мощности в виде горячей воды можно использовать для нужд горячего водоснабжения или расходовать на буферную нагрузку. В качестве буферной нагрузки может выступать градирня, в которой нагретая вода разбрызгивается в специальный открытый резервуар, охлаждаясь естественным путём.

В летние месяцы, когда потребность в тепловой энергии минимальна или вообще отсутствует, избыточную энергию от ВЭУ можно накапливать в виде горячей воды, закачивая её в сезонные аккумуляторы тепла, в качестве которых могут выступать естественные и искусственные ёмкости больших объёмов (подземные водохранилища, шахты, водоносные горизонты, подземные пустоты и др.).

Рассмотрим более подробно каждый элемент (условие) алгоритма работы энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА», представленного на рис. 2.

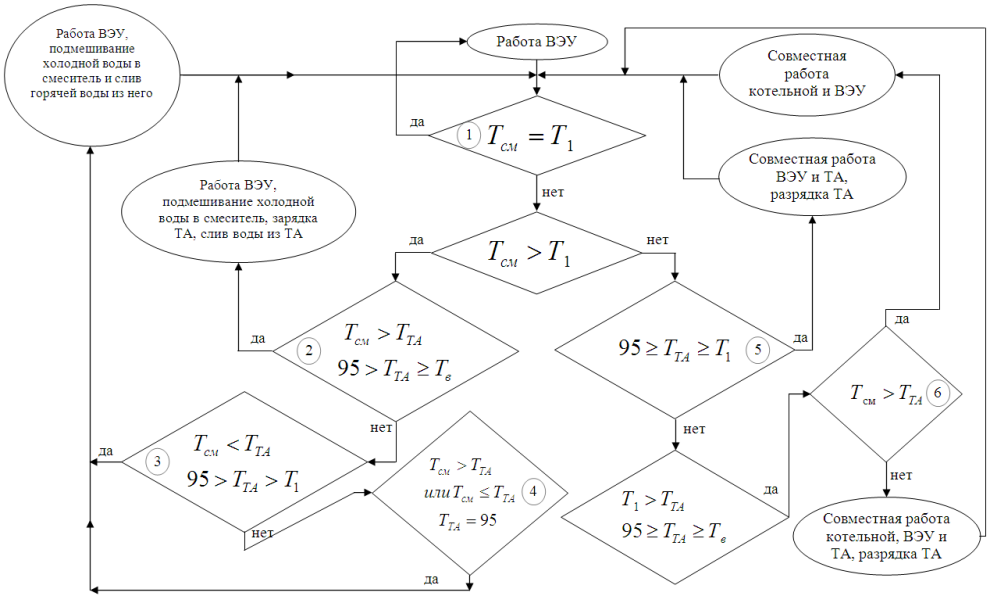


Рис. 2. Алгоритм управления энергокомплексом «котельная + ВЭУ + ТА»

Условие 1. Оно записано в верхней части рис. 2 и гласит, что температура воды $T_{\text{см}}$, нагреваемой от ВЭУ и поступающей в котельную, равна расчётной температуре T_1 согласно температурному графику тепловой сети ($T_{\text{см}} = T_1$). В этом случае теплоснабжение осуществляется только за счёт работы ВЭУ, а котельная и ТА находятся в режиме ожидания тепловой нагрузки. Тогда тепловой баланс для смесителя можно записать в виде:

$$Q_{\text{см}} = Q_{\text{кот}}^{(0)} + Q_{\text{ВЭУ}}. \qquad (1)$$

Далее, преобразуя уравнение (1), можно найти зависимость, определяющую температуру воды, нагреваемой за счёт ВЭУ:

$$T_{\text{см}} = \frac{Q_{\text{кот}}^{(0)} + Q_{\text{ВЭУ}}}{\nu_1 \cdot C_{\text{р}}}. \qquad (2)$$

Условие 2. Если указанное выше первое условие не выполняется, т. е. $T_{\text{см}} \neq T_1$, то возможны два варианта: $T_{\text{см}}$ либо больше, либо меньше T_1.

Если $T_{см} > T_1$ (рис. 2, левая часть), то в этом случае в зависимости от состояния ТА накладываются дополнительные условия. При $T_{см} > T_{ТА}$ и $95 > T_{ТА} \geq T_в$ ($T_в$ — температура помещения, где установлен ТА) теплоснабжение осуществляется так же, как и в первом случае, за счёт работы ВЭУ, но ТА находится уже в режиме зарядки (рис. 2, условие 2). Зарядка происходит за счёт пополнения ТА горячей водой, поступающей из смесителя с температурой $T_{см}$ и в количестве $\nu_{х.\,в.}$, для этого из ТА предусмотрен одновременный слив воды с температурой $T_{ТА}$. Пополнение водой продолжается до тех пор, пока ТА не зарядится полностью.

Так как $T_{см} > T_1$, то для подачи воды в тепловую сеть с нужной температурой необходимо охладить воду в смесителе до T_1, для этого предусмотрено подмешивание холодной воды, которая поступает в смеситель с температурой $T_{х.\,в.}$ и расходом $\nu_{х.\,в.}$.

Тогда уравнение теплового баланса для смесителя выглядит так:

$$Q_1 = Q_{кот}^{(0)} + Q_{ВЭУ} + Q_{х.в.} - Q_{ТА}^{(0)}, \tag{3}$$

где $Q_{х.в.} = T_{х.в.} C_р \nu_{х.в.}$ и $Q_{ТА}^{(0)} = T_{см} C_р \nu_{х.в.}$ — количество тепловой энергии, поступающей в единицу времени соответственно в смеситель и из него в аккумулятор. Отсюда расход воды можно оценить по формуле:

$$\nu_{х.в.} = \frac{Q_1 - Q_{кот}^{(0)} - Q_{ВЭУ}}{T_{х.в.} \cdot C_р - T_{см} \cdot C_р}, \tag{4}$$

где $T_{см}$ определяется выражением (2).

Уравнение теплового баланса, описывающее состояние аккумулятора, представляет собой зависимость следующего вида:

$$\frac{d(V_{ТА} C_р T_{ТА})}{dt} = Q_{ТА}^{(0)} - Q_{слив} - Q_{пот}, \tag{5}$$

где $Q_{слив} = T_{ТА} C_р \nu_{х.в.}$ — тепло, уходящее из ТА в виде нагретой воды; $Q_{пот}$ — тепловые потери аккумулятора.

Если предположить, что аккумулятор хорошо теплоизолирован, то тогда тепловыми потерями можно пренебречь.

Интегрирование уравнения (5) даёт экспоненциальную зависимость температуры теплового аккумулятора от времени при начальных условиях ($t = 0$) $T_{ТА_0}$, $T_{см_0}$:

$$T_{ТА} = T_{см} + (T_{ТА_0} - T_{см_0}) \cdot \exp\left[-\frac{\nu_{х.в.}}{V_{ТА}} \cdot t \right], \tag{6}$$

где $Q_{пот} = 0$, $t = 24$ часа (если при расчётах используются среднесуточные значения).

Условия 3 и 4. Если второе условие не выполняется, то будет верно одно из следующих условий:

- условие 3 — это случай, когда ТА ещё заряжен не полностью, а температура воды смесителя меньше температуры воды ТА (рис. 2, условие 3);
- четвёртое условие характеризуется полной зарядкой ТА ($T_{\text{ТА}}$ = 95 ºС).

При этом температура воды в смесителе $T_{\text{см}}$ может быть не только больше или меньше, но и равна температуре воды в аккумуляторе $T_{\text{ТА}}$ ($T_{\text{см}} \geq T_{\text{ТА}}$ или $T_{\text{см}} \leq T_{\text{ТА}}$) (рис. 2, условие 4).

При выполнении условия 3 или 4 котельная и ТА находятся в режиме ожидания тепловой нагрузки. Имеющийся избыток тепловой энергии будет сбрасываться из смесителя в виде горячей воды и расходоваться на буферную нагрузку.

Условия 3 и 4 друг друга заменяют. То есть в случае, если условие 3 не выполнено, то энергокомплекс «котельная + ВЭУ + ТА» будет работать согласно условию 4 и наоборот.

Тепловой баланс смесителя (3) можно переписать следующим образом:

$$Q_1 = Q_{\text{кот}}^{(0)} + Q_{\text{ВЭУ}} + Q_{\text{х.в.}} - Q_{\text{слив}}, \qquad (7)$$

где $Q_{\text{слив}} = T_{\text{см}} C_{\text{р}} \nu_{\text{х.в.}}$ характеризует избыток энергии, выдаваемой от ВЭУ, который содержится в виде горячей воды с температурой $T_{\text{см}}$ и удаляется из смесителя в количестве $\nu_{\text{х. в.}}$.

Чтобы определить $\nu_{\text{х. в.}}$ и $T_{\text{см}}$, можно использовать соответственно формулы (4) и (2).

Условие 5 соответствует условию $T_1 > T_{\text{см}}$ — правая часть алгоритма (рис. 2).

Если $95 \geq T_{\text{ТА}} \geq T_1$, то в этом случае теплоснабжение осуществляется за счёт совместной работы комплекса «ВЭУ + ТА», при этом ТА находится в состоянии разрядки (рис. 2, условие 5).

Тепловой баланс смесителя можно определить по формуле:

$$Q_1 = Q_{\text{кот}}^{(0)} + Q_{\text{ВЭУ}} + Q_{\text{ТА}} - Q_{\text{ТА}}^{(0)}, \qquad (8)$$

где $Q_{\text{ТА}} = T_{\text{ТА}} C_{\text{р}} \nu_{\text{ТА}}$ и $Q_{\text{ТА}}^{(0)} = T_{\text{см}} C_{\text{р}} \nu_{\text{ТА}}$ соответственно тепло, поступающее в смеситель, и тепло, извлекаемое из него.

Расход воды ТА после некоторых преобразований можно определить из следующего соотношения:

$$\nu_{\text{ТА}} = \frac{Q_1 - Q_{\text{кот}}^{(0)} - Q_{\text{ВЭУ}}}{T_{\text{ТА}} \cdot C_{\text{р}} - T_{\text{см}} \cdot C_{\text{р}}}. \qquad (9)$$

Уравнение теплового баланса ТА можно представить в следующем виде:

$$\frac{d(V_{\text{ТА}} C_{\text{р}} T_{\text{ТА}})}{dt} = Q_{\text{ТА}}^{(0)} - Q_{\text{ТА}}. \qquad (10)$$

По аналогии с (6) экспоненциальная зависимость температуры воды теплового аккумулятора с начальными условиями (t = 0) $T_{\text{ТА}_0}$, $T_{\text{см}_0}$ будет выглядеть так:

$$T_{\text{ТА}} = T_{\text{см}} + (T_{\text{ТА}_0} - T_{\text{см}_0}) \cdot \exp\left[-\frac{\nu_{\text{ТА}}}{V_{\text{ТА}}} \cdot t \right], \quad (11)$$

где t = 24 часа.

Условие 6. Следующие случаи характеризуют систему, когда не только $T_1 > T_{\text{см}}$, но и $T_1 > T_{\text{ТА}}$. В этих случаях температура ТА может находиться в диапазоне $95 \geq T_{\text{ТА}} \geq T_{\text{в}}$. При этом если $T_{\text{см}} > T_{\text{ТА}}$, то теплоснабжение осуществляется совместной работой энергокомплекса «котельная + ВЭУ», а ТА находится в состоянии ожидания тепловой нагрузки. Если $T_{\text{см}} < T_{\text{ТА}}$, в этом случае теплоснабжение осуществляется от энергокомплекса «котельная + ВЭУ + ТА», где ТА находится в состоянии разрядки (рис. 2, условие 6). Температуру смесителя $T_{\text{см}}$ можно определить с помощью формулы (2). Данные варианты соответствуют периодам холодной маловетреной погоды, когда нагрузка в значительной мере или полностью ложится на котельную.

Выводы

1. Разработан алгоритм управления энергетическим комплексом, включающим в свой состав котельную, ветроэнергетическую установку и тепловой аккумулятор и предназначенным для отопления потребителей.
2. Применение такого алгоритма на практике позволит решить задачу оптимизации работы системы теплоснабжения с несколькими источниками тепловой энергии с целью обеспечения корректного функционирования такой системы и повышения её энергоэффективности.
3. Разработанная версия алгоритма является базовой. Её использование предполагает проектирование и разработку интеллектуального автоматизированного блока управления, который должен анализировать любые изменения, происходящие в работе энергокомплекса, и реагировать на них, посылая команды в соответствии с разработанным алгоритмом действий.

Литература

1. Бежан А. В., Минин В. А. Оценка эффективности системы теплоснабжения на основе котельной и ветроустановки в условиях Севера // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 51–59.
2. Бежан А. В., Минин В. А. Оценка перспектив использования энергии ветра для теплоснабжения посёлка Териберка // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2011. Вып. 3. С. 205–213.

Сведения об авторе

Бежан Алексей Владимирович,
младший научный сотрудник лаборатории энергосбережения и возобновляемых источников энергии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А,
Эл. почта: abezh@rambler.ru